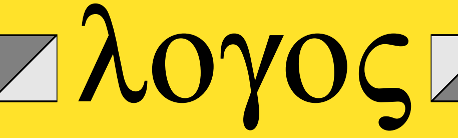
Studien zum Physik- und Chemielernen
M. Hopf, H. Niedderer, M. Ropohl, E. Sumfleth [Hrsg.]
333

Erik Heine

Wissenschaftliche Kontroversen im Physikunterricht

Explorationsstudie zum Umgang von Physiklehrkräften und Physiklehramtsstudierenden mit einer wissenschaftlichen Kontroverse am Beispiel der Masse in der Speziellen Relativitätstheorie



Studien zum Physik- und Chemielernen

Herausgegeben von Martin Hopf, Hans Niedderer, Mathias Ropohl und Elke Sumfleth

Diese Reihe im Logos Verlag Berlin lädt Forscherinnen und Forscher ein, ihre neuen wissenschaftlichen Studien zum Physik- und Chemielernen im Kontext einer Vielzahl von bereits erschienenen Arbeiten zu quantitativen und qualitativen empirischen Untersuchungen sowie evaluativ begleiteten Konzeptionsentwicklungen zu veröffentlichen. Die in den bisherigen Studien erfassten Themen und Inhalte spiegeln das breite Spektrum der Einflussfaktoren wider, die in den Lehr- und Lernprozessen in Schule und Hochschule wirksam sind.
Die Herausgeber hoffen, mit der Förderung von Publikationen, die sich mit dem Physik- und Chemielernen befassen, einen Beitrag zur weiteren Stabilisierung der physik- und chemiedidaktischen Forschung und zur Verbesserung eines an den Ergebnissen fachdidaktischer Forschung orientierten Unterrichts in den beiden Fächern zu leisten.

Martin Hopf, Hans Niedderer, Mathias Ropohl und Elke Sumfleth

Studien zum Physik- und Chemielernen

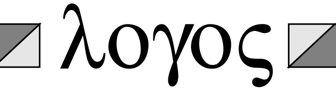
Band 333

Erik Heine

Wissenschaftliche Kontroversen im Physikunterricht

Explorationsstudie zum Umgang von Physiklehrkräften und Physiklehramtsstudierenden mit einer wissenschaftlichen Kontroverse am Beispiel der Masse in der Speziellen Relativitätstheorie

Logos Verlag Berlin



Studien zum Physik- und Chemielernen
Martin Hopf, Hans Niedderer, Mathias Ropohl und Elke Sumfleth [Hrsg.]

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.



ISBN 978-3-8325-5478-1
ISSN 1614-8967

Logos Verlag Berlin GmbH
Georg-Knorr-Str. 4, Geb. 10
D-12681 Berlin

Tel.: +49 (0)30 / 42 85 10 90
Fax: +49 (0)30 / 42 85 10 92
https://www.logos-verlag.de

Wissenschaftliche Kontroversen im Physikunterricht

Explorationsstudie zum Umgang von Physiklehrkräften und Physiklehramtsstudierenden mit einer wissenschaftlichen Kontroverse am Beispiel der Masse in der Speziellen Relativitätstheorie

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades Doctor rerum naturalium (Dr. rer. nat.)

vorgelegt dem Bereich Mathematik und Naturwissenschaften
der Technischen Universität Dresden

von

Erik Heine

Gutachter/innen:
Prof. Dr. Gesche Pospiech (Technische Universität Dresden)
Prof. Dr. Karsten Rincke (Universität Regensburg)

Verteidigt am 21. Februar 2022
an der Fakultät Physik
der Technischen Universität Dresden

Danksagung

Was einem gelingt, erwächst meist nie allein nur aus eigener Kraft. Ohne die vielen Menschen, die während der letzten Jahre der Promotion hinter mir oder an meiner Seite standen, hätte diese Arbeit nicht entstehen können. Ich möchte deshalb an dieser Stelle die Gelegenheit nutzen, mich bei einigen von ihnen besonders zu bedanken.

Mein Dank gilt vor allem Frau Prof. Dr. Gesche Pospiech, die mir als Betreuerin immer eine gute Ratgeberin war. Ihre Tür stand mir stets offen und ich danke ihr dafür, dass sie sich ungeachtet eines vollen Terminkalenders auch oft kurzfristig und spontan Zeit für ein Gespräch nahm. Besonders schätze ich den Freiraum, den sie mir gewährte, das konkrete Thema dieser Arbeit zu finden und zu vertiefen, so dass ein Projekt entstehen konnte, in dem ich auch meinen persönlichen Interessen an den Inhalten nachgehen durfte. Herzlichen Dank für Ihre Aufgeschlossenheit und all die Rückmeldungen zu meinen Gedanken.

Bedanken möchte ich mich auch bei Prof. Dr. Karsten Rincke, der sich trotz sicher geringer freier zeitlicher Ressourcen direkt und so bestechend freundlich bereit erklärt hat, das Zweitgutachten für die Dissertation zu erstellen. Vielen Dank für Ihre Mühe und Arbeit.

Die Arbeitsgruppe an der Professur für Didaktik der Physik an der TU Dresden war mir insgesamt eine große Hilfe bei der Schärfung meiner Ideen und Überlegungen. Ihnen allen gebührt ein großer Dank für die zahlreichen Diskussionen zur Entwicklung des Vorhabens und der Ergebnisse der Studie, für das Hinterfragen, die Anregungen und das Feedback, das sie mir gaben. Von der Expertise jedes einzelnen, den methodischen Hinweisen und der so selbstverständlichen Bereitschaft aller, sich aufrichtig und tief in meine Gedankenwelt mit hinein zu denken, habe ich viel profitieren können.

Ich hatte das Glück, in Elise Stroetmann eine absolut gewissenhafte, zuverlässige und tatkräftige Intercoderin finden zu können. Sie hat sich in die umfangreichen Codierleitfäden eingearbeitet und war immer eine angenehme Diskussionspartnerin beim Abgleich der Codierungen des Datenmaterials, was zur Optimierung der Leitfäden und Qualität der Arbeit beigetragen hat.

Meinen Dank möchte ich auch all den Lehrkräften und Studierenden aussprechen, die Zeit und Geduld aufgebracht haben, um mich bei der Pilotierung und Datengewinnung zu unterstützen. Dies war vermutlich auch herausfordernd und anstrengend, hat mir aber erst die Möglichkeit eröffnet, meine Fragestellungen wirklich untersuchen zu können.

Ein ganz besondere Dank kommt dem Zentrum für Lehrerbildung, Schul- und Berufsbildungsforschung (ZLSB) der TU Dresden zu, das mir überhaupt erst die Gelegenheit gab, als Lehrer an die Universität zurück zu kehren, um dieses Promotionsprojekt realisieren zu können. Insbesondere Prof. Dr. Axel Gehrmann danke ich für sein unermüdliches Engagement, Stellen für abgeordnete Lehrkräfte an der TU Dresden zu schaffen sowie entsprechende Bedingungen und Förderungsmöglichkeiten für die Promotion auszugestalten. Dr. Frank Beier

hat meine Arbeit im Rahmen des Graduiertenforums mit begleitet und war jederzeit offen für den Austausch zu meinem aktuellen Arbeitsstand.

Meinen beiden fleißigen und interessierten Korrekturleserinnen danke ich ganz herzlich, für das teilweise vielfach wiederholte Lesen einzelner Passagen, um noch den letzten Tippfehler zu entdecken. Scheinbar Buchstabe für Buchstabe wurde gelesen und sich quälenden Kommaregeln angenommen. Die investierte Zeit ist für mich absolut nicht selbstverständlich.

Unendlich dankbar bin ich meiner wundervollen Frau, die mich immerzu und unaufhörlich in jeder erdenklichen Art und Weise dabei unterstützt, meine eigenen Ziele zu verwirklichen. Sie hat mich beständig motiviert, mir geholfen ausdauernd zu sein, sich meine Probleme angehört, mir Mut gegeben und meine Energiespeicher fortlaufend wieder aufgeladen. Verständnisvoll konnte sie darüber lächeln, wenn ich nicht ansprechbar war, weil ich vorher einen Satz zu Papier bringen musste, der noch im Hirn festhing. Auch inhaltlich hat sie diese Arbeit durch ihrer Klugheit, ihr Wissen und ihren analytischen Blick bereichert. Während der Pandemie hatte ich das Glück, die beste „Büropartnerin“ im Homeoffice haben zu können, die man sich vorstellen kann. Danke!

Erik Heine, Mai 2021

Kurzfassung

Der Prozess der Erkenntnisgewinnung in den Naturwissenschaften ist untrennbar mit wissenschaftlichen Kontroversen verbunden. Damit besitzt die Auseinandersetzung mit wissenschaftliche Kontroversen auch für den Physikunterricht einen Bildungswert, da im Hinblick auf gesellschaftliche Teilhabe und kritische Urteilsbildung ein Beitrag zur *Scientific Literacy* der Lernenden geleistet werden kann.

Um die Bedeutung wissenschaftlicher Kontroversen für den Physikunterricht konkret erfassen zu können, werden zunächst sieben Merkmale zur Charakterisierung einer wissenschaftliche Kontroverse identifiziert. Schwerpunktmäßig liegt das Bildungspotenzial wissenschaftlicher Kontroversen in den Bereichen Kommunikationskompetenz und Erkenntnisgewinnungskompetenz, zu der insbesondere die Vermittlung angemessener *Nature-of-Science*-Vorstellungen zählt. Diesbezüglich legen empirische Ergebnisse der fachdidaktischen Forschung nahe, dass ein angemessenes *Nature-of-Science*-Verständnis der Lehrkräfte selbst sowie Kompetenzen für die Darstellung von *Nature-of-Science*-Inhalten im Unterricht eine notwendige Voraussetzung gelingender Lerngelegenheiten im Bereich von *Nature of Science* sind. Damit wird die Realisierung des Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen maßgeblich durch die jeweilige Lehrkraft und die Gestaltung des Unterrichts bestimmt sein. Wie Lehrkräfte im Physikunterricht mit wissenschaftlichen Kontroversen umgehen, wurde in der Fachdidaktik jedoch bisher kaum erforscht. Aus diesem Desiderat ergibt sich das übergeordnete Forschungsziel dieser Arbeit, zu analysieren, wie (angehende) Physiklehrkräfte mit wissenschaftlichen Kontroversen, die für den Physikunterricht relevant sind, umgehen und inwieweit sie deren Bildungswert nutzen.

Die Fragestellung wird in einer explorativ-qualitativen Laborstudie mit sächsischen Physiklehrkräften ($N = 43$) und Physiklehramtsstudierenden ($N = 22$) untersucht. Das Studiendesign orientiert sich am Modell des Entscheidens nach Betsch, Funke und Plessner (2011, vgl. S. 75). Als Erhebungskontext wird die wissenschaftliche Kontroverse um den Begriff der relativistischen Masse gewählt. Die Befragten werden hierzu mit verschiedenen Textmaterialien zu den gegensätzlichen Fachpositionen dieser Kontroverse konfrontiert und aufgefordert, eine Auflistung ihrer wichtigsten Gedanken vorzunehmen. Im Anschluss daran bearbeiteten die Studienteilnehmenden vier verschiedene Textvignetten mit Bezug zur Thematik der Relativität der Masse im Physikunterricht. Um die fachliche Positionierung vor und nach der Auseinandersetzung mit der wissenschaftliche Kontroverse erfassen zu können, werden zwei Fragebogen eingesetzt. Alle Daten werden computergestützt analysiert und mithilfe der inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2016) ausgewertet.

Die Ergebnisse der Gedankenauflistungen zeigen, dass die Befragten aufgrund der Konfrontation mit unterschiedlichen wissenschaftlichen Positionen ihr eigenes Wissen reflektieren,

sich mitunter inhaltlich tiefgründig mit den Aussagen und Argumenten auseinandersetzen, sich selbst positionieren und Konsequenzen für den Physikunterricht ableiten. Im Entscheidungsprozess über die Art der Darstellung der kontroversen Thematik im Unterricht zählen Unterrichts- bzw. Schülertauglichkeit, aber auch die fachliche Richtigkeit zu den am häufigsten vorkommenden Bewertungskriterien. Daneben können anhand der Gedankenlisten *Nature-of-Science*-Vorstellungen der Studienteilnehmenden rekonstruiert werden, die vor allem die empirische Natur der Physik, Aushandlungsprozesse im Rahmen kontroverser Diskurse sowie Aspekte der Dynamik wissenschaftlicher Erkenntnisse betreffen.

Mithilfe der Daten zu den Textvignetten können die Handlungsintentionen und -möglichkeiten der (angehenden) Physiklehrkräfte im Zusammenhang mit einer wissenschaftlichen Kontroverse im Unterrichtskontext beschrieben werden. Dabei zeigt sich, dass die wissenschaftliche Kontroverse den Befragten Lerngelegenheiten zur Thematisierung von *Nature-of-Science*-Aspekten, wie beispielsweise die Kontroversität in wissenschaftlichen Aushandlungsprozessen oder die Vorläufigkeit und Entwicklung wissenschaftlicher Erkenntnisse, im Physikunterricht ermöglicht.

Insgesamt deuten die Daten darauf hin, dass bei den Lehramtsstudierenden möglicherweise eher mit einer offenen Haltung gegenüber unterschiedlichen, kontroversen fachwissenschaftlichen Positionen und mit einer tendenziell weniger gefestigten eigenen Fachposition gerechnet werden kann als bei den Lehrkräften. Im Vergleich der Studienteilnehmenden zeigen sich Unterschiede, die durch die Konstruktion fünf verschiedener Typen systematisch beschrieben werden können. Die Typenbildung basiert auf einem dreidimensionalen Merkmalsraum mit den Dimensionen *Kontroversität*, *Nature of Science* und *eigene Position*. Eine Mehrheit der in den Typen gruppierten Studienteilnehmenden weist Ansätze zur Umsetzung von Kontroversität im Physikunterricht auf. Daneben vertritt ein Großteil dieser Befragten auch eine eigene fachwissenschaftliche Position vor den Lernenden. Etwa die Hälfte nutzt die wissenschaftliche Kontroverse im Unterricht zur Thematisierung von *Nature-of-Science*-Aspekten bzw. intendiert dies. Insofern lassen sich wesentliche Unterschiede zwischen den einzelnen Studienteilnehmenden bei der Nutzung des Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen im Physikunterricht feststellen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

1.1 Problem- und Zielstellung

Wissenschaft ist keine Sammlung objektiver Fakten und gesetzter, unveränderlicher Wissensbestände. Sie lebt von Diskurs und Entwicklung. Wissenschaftliche Erkenntnisse verändern sich dynamisch und werden in sozialen Prozessen verhandelt. Dabei sind Wissenschaftler[1] nicht immer einer Meinung, sondern diskutieren ihre unterschiedlichen, teils gegensätzlichen Positionen auf Konferenzen und in Form wissenschaftlicher Publikationen. Nicht alle dieser Meinungsverschiedenheiten und Diskussionspunkte lassen sich jedoch mit wissenschaftlichen Methoden auflösen und durch Argumentation klären. Auch unter Wissenschaftlern manifestieren sich so unentscheidbare Fragestellungen in Form fachwissenschaftlicher Kontroversen, die innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft eine wesentliche Rolle spielen. Kontroversen zwischen Wissenschaftlern sind ein unerlässliches Element wissenschaftlicher Praxis sowie treibende Kraft der Erkenntnisgewinnung. Sie sind in diesem Sinne „konstitutiv für Wissenschaft" (Liebert 2006, S. 129) und ein „Motor des Erkenntnisfortschritts" (Nehrdich 2011, S. 18).

Dies zu verstehen und Einsicht in die Kontroversität der Wissenschaft zu gewinnen, ist vor dem Hintergrund der Bedeutung wissenschaftlicher Erkenntnisse für moderne Gesellschaften unerlässlich. Die Lösungen einiger der herausragendsten und komplexesten Probleme für die Menschheit in der heutigen Zeit - zum Beispiel der Klimawandel, die Energieversorgung, die Erhaltung der Biodiversität und die Bekämpfung von Krankheiten - sind auf Erkenntnisse der Wissenschaften und der damit verbundenen technologischen Errungenschaften angewiesen. Daher benötigen die Mitglieder der Gesellschaft ein Verständnis für wissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen, sie müssen zumindest prinzipiell nachvollziehen können, „wie Wissenschaft funktioniert", um an Entscheidungsprozessen teilhaben und die Zukunft gestalten zu können. Ohne eine dementsprechende wissenschaftliche Grundbildung (*Scientific Literacy*), die auch adäquate Vorstellungen zum Status und der Genese wissenschaftlichen Wissens beinhalten sollte, können Sachverhalte mit Wissenschaftsbezug nicht hinreichend erfasst und eingeordnet werden. Zu begreifen, dass wissenschaftliche Kontroversen ein natürlicher Bestandteil des wissenschaftlichen Arbeits- und Erkenntnisprozesses sind, ist essentiell, um gesellschaftliche Missverständnisse zu vermeiden, in denen die Uneinigkeit und der Diskurs unter Wissenschaftlern als Defizite ausgelegt werden. Wenn wissenschaftliche Positionen in Medien in einer unangemessenen Konkurrenz zueinander dargestellt werden, weil Kontroversität in der Wissenschaft nicht akzeptiert und verstanden wird, besteht die Gefahr, wissenschaftliche

[1] Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf die gleichzeitige Verwendung der Sprachformen männlich, weiblich und divers (m/w/d) verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für alle Geschlechter. Die verkürzte Sprachform beinhaltet keinerlei Wertung.

Erkenntnisse gegeneinander auszuspielen und deren Bedeutung für die Gesellschaft aufgrund einer zu starken Relativierung der Erkenntnisse in der Öffentlichkeit zu unterminieren. Dies kann für eine Gesellschaft ernste Auswirkungen haben, wenn wissenschaftlichen Aussagen in Folge dessen nicht mehr das notwendige Gehör geschenkt wird. Deshalb ist ein Verständnis für Kontroversen innerhalb der Wissenschaft ein unverzichtbarer Aspekt naturwissenschaftlicher Bildung.

Ein dem gemäßes Wissen in und über die Naturwissenschaften anzubahnen, gehört zur Aufgabe des naturwissenschaftlichen Unterrichts an Schulen, um Lernenden gesellschaftliche Teilhabe zu ermöglichen, sie darauf vorzubereiten, im Rahmen demokratischer Prozesse wohlbegründete Entscheidungen zu treffen, aber auch um auf individueller Gestaltungsebene zu fundierten Urteilen zu gelangen und sich selbst reflektiert verhalten zu können. Heranwachsende sollten somit Diskurse und Kontroversität als Wesensmerkmal naturwissenschaftlicher Praxis verstehen und die Unterschiedlichkeit wissenschaftlicher Standpunkte angemessen einordnen können. Die Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Kontroversen im naturwissenschaftlichen Unterricht besitzt daher einen besonderen Bildungswert. Konkret wird die Realisierung dieses Bildungswertes dabei abhängig von der spezifischen Gestaltung des Unterrichts und damit von der jeweiligen Lehrkraft sein. Um zu ergründen, inwiefern Lehrkräften die Nutzung dieses Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen im naturwissenschaftlichen Unterricht gelingt und inwieweit Unterstützungsbedarfe auf Seiten der Lehrenden notwendig sind, damit das Potenzial wissenschaftlich kontroverser Themen im Unterricht ausgeschöpft werden kann, muss zunächst geklärt werden, wie Lehrkräfte mit solchen kontroversen Unterrichtsinhalten umgehen.

Der Physikunterricht an Schulen leistet einen erheblichen Beitrag zur naturwissenschaftlichen Grundbildung der Lernenden, so dass sich die oben skizzierte Problemstellung im Speziellen für das Fach Physik stellt. Aus diesem Grund ergeben sich die folgenden übergeordneten Zielstellungen für die vorliegende physikdidaktische Arbeit: Zum einen soll die Bedeutung und die damit einhergehenden konkreten Elemente des Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen für den Physikunterricht identifiziert werden. Ein zweites Ziel liegt in der Erarbeitung von Prinzipien, die der Kontroversität im Physikunterricht zuträglich sind, um die Frage beantworten zu können, wie Physiklehrkräfte mit wissenschaftlichen Kontroversen im Unterricht umgehen sollten. Zusätzlich soll empirisch untersucht werden, wie Physiklehrkräfte mit wissenschaftlichen Kontroversen, die für den Physikunterricht relevant sind, umgehen und inwiefern sie deren Bildungswert nutzen.

1.2 Aufbau und Inhalt der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in drei Teile. Im ersten Teil werden die theoretischen Grundlagen und der Stand der Forschung beschrieben. Dazu werden zu Beginn des Kapitels 2 zunächst Merkmale einer wissenschaftlichen Kontroverse erläutert, um den Begriff näher bestimmen zu können. Darauf aufbauend wird ausgeführt, welchen Bildungswert wissenschaftliche Kontroversen speziell für den Physikunterricht besitzen. Da hierbei ein Zusammenhang zur Vermittlung von *Nature of Science* besteht, wird zusammengefasst, welche Gesichtspunkte wissenschaftlicher Kontroversen mit *Nature-of-Science*-Aspekten, wie sie in der Fachdidaktik beschrieben werden, in Zusammenhang stehen. Im Anschluss daran werden empirische Forschungsergebnisse zu den *Nature-of-Science*-Vorstellungen von Schülern und zur Rolle des *Nature-of-Science*-Verständnisses von Lehrkräften für entsprechende Lerngelegenheiten dargestellt. In Kapitel 2.4 wird beleuchtet, welche Herausforderungen für die Gestaltung eines Unterrichts mit Einbezug wissenschaftlicher Kontroversen bestehen und wie Lehrkräfte diesen begegnen können. Hierzu werden verschiedene Prinzipien als Leitideen für einen Kontroversität berücksichtigenden Unterricht genannt. Obwohl in der fachdidaktischen Forschung bisher kaum Untersuchungsergebnisse dazu vorliegen, wie Lehrkräfte im naturwissenschaftlichen Unterricht mit wissenschaftlichen Kontroversen umgehen, werden erste Erkenntnisse aus der Forschung hierzu dargelegt. Weil Lehrkräfte im Zusammenhang mit wissenschaftlich kontroversen Themen prinzipiell vor der Entscheidungssituation stehen, wie sie die jeweiligen Inhalte im Unterricht darstellen sollen, wird ein Rahmenmodell für den Prozess des Entscheidens nach Betsch, Funke und Plessner (2011) beschrieben, das später der Strukturierung des Erhebungsinstrumentes dient.

In Kapitel 3 wird die wissenschaftliche Kontroverse um die Relativität der Masse in der Speziellen Relativitätstheorie exemplarisch dargestellt und analysiert, um als Kontext der Erhebung im Rahmen der im zweiten Teil dargestellten empirischen Studie verwendet werden zu können. Dabei folgt auf die ausführliche Erläuterung der sich in dieser Kontroverse gegenüberstehenden beiden Fachpositionen bzw. Ansätze die Einordnung der Thematik als Kontroverse anhand der in Kapitel 2.1 aufgestellten Merkmale. Aufgrund der Tatsache, dass die Relativität der Masse als Inhalt in den Lehr- bzw. Bildungsplänen einiger deutscher Bundesländer verortet ist, wird in Kapitel 3.3 geschlussfolgert, welchen Leitideen der Physikunterricht bei der Behandlung der Masse in der relativistischen Dynamik folgen sollte.

Der zweite Teil der Arbeit umfasst das Design und die Ergebnisse der empirischen Studie. Von der genaue Zielsetzung des Forschungsprojektes ausgehend, werden in Kapitel 4 die Forschungsfragen abgeleitet. Kapitel 5 beinhaltet grundlegende Überlegungen zum explorativ-qualitativen Forschungsdesign, die Begründung der Wahl der Erhebungsinstrumente, eine Darstellung der Durchführung der Datenerhebung und die Beschreibung der Auswertungsmethoden. Die einzelnen Schritte zur Entwicklung der Erhebungsinstrumente werden in Kapitel 6 erfasst. In Kapitel 7 werden die Teilnehmenden der Studie hinsichtlich ausgewählter Merkmale beschrieben und dargelegt, welchen Prinzipien das Sampling folgt. Alle Ergebnisse der Studie werden in Kapitel 8 zusammengetragen, in dem auch die Bildung von Typen ausgeführt wird.

Teil drei fasst die Erkenntnisse der Arbeit insgesamt zusammen (Kapitel 9) und enthält eine Diskussion der Ergebnisse der empirischen Studie. Diese werden in Kapitel 10 im Hinblick auf bereits vorhandene Erkenntnisse aus Theorie und Forschung eingeordnet und interpretiert. Kapitel 11 gibt die Grenzen der Studienergebnisse unter Berücksichtigung des spezifischen Studiendesigns wieder. In Kapitel 12 werden schließlich Implikationen einerseits für die fachdidaktische Forschung und andererseits für die Lehrerbildung abgeleitet.

I THEORETISCHE GRUNDLAGEN UND STAND DER FORSCHUNG

2 Wissenschaftliche Kontroversen im Physikunterricht

Unsere Wissenschaft ist kein System von gesicherten Sätzen, auch kein System, das in stetem Fortschritt einem Zustand der Endgültigkeit zustrebt.
— Karl R. Popper, *Logik der Forschung*

2.1 Charakterisierung wissenschaftlicher Kontroversen

2.1.1 Merkmale einer Kontroverse im Allgemeinen

Ausgangspunkt dieses Kapitels ist die Fragestellung, was unter einer wissenschaftlichen Kontroverse verstanden werden kann: *Wann ist ein Thema kontrovers? Was ist eine wissenschaftliche Kontroverse?* Um diese Fragen beantworten zu können, wird zunächst der Begriff der *Kontroverse* allgemein charakterisiert, um anschließend im Speziellen Eigenschaften *wissenschaftlicher Kontroversen* (als Teilmenge von Kontroversen im Allgemeinen) ableiten zu können. Ziel ist es, anhand einzelner Merkmale den Begriffsumfang hinreichend genau zu definieren, um eine Grundlage für diese Arbeit bilden zu können.

In der wissenschaftlichen Literatur wird der Begriff der Kontroverse nicht einheitlich verwendet, was sich sowohl im Gebrauch unterschiedlicher Begriffsdefinitionen als auch voneinander abweichender Unterscheidungen spezieller Kontroversenarten zeigt. So reicht das Spektrum der Ansätze von Kurzdefinitionen, die den kleinsten gemeinsamen Kern des Begriffes erfassen sollen (z. B. Ohl 2013 oder Weitze 2006), bis hin zur Beschreibung einer Liste wesensbestimmender Merkmale (z. B. Dascal 2006 oder Levinson 2006). Ein sehr breites Bild des Begriffs zeichnen beispielsweise Kerr et al. (2015, S. 8) in ihrer Handreichung zum Lehrkräftefortbildungsprogramm für das Unterrichten kontroverser Themen (entstanden für ein Projekt des Europarats und der Europäischer Union). Im Sinne einer Kurzdefinition verstehen die Autoren unter Kontroversen alle „Themen, die starke Gefühle hervorrufen und zu widersprüchlichen Meinungen in den Gemeinschaften und in der Gesellschaft führen“. Demgegenüber schlagen Oulton, Dillon und Grace (2004, vgl. S. 412) für den Schulunterricht eine Liste verschiedener typischer Aspekte von Kontroversen vor, über die Schüler informiert sein sollten, damit sie die Natur von Kontroversen erfassen können. Darunter sind unter anderem das Bestehen verschiedener Standpunkte in der Gesellschaft, deren Auflösbarkeit durch neugewonnene Informationen, aber auch die Unauflösbarkeit durch Mittel der Vernunft, der Logik oder mithilfe von Experimenten. Ein weithin etablierter Konsens darüber, was als kontrovers bezeichnet werden kann und welche Bedingungen an das Vorhandensein einer Kontroverse geknüpft sind, scheint kaum zu bestehen. Vielmehr zeigt sich, dass der Begriff und seine Anwendung bereits selbst

Gegenstand einer kontroversen Debatte im Hinblick auf seine Bedeutung sein kann (vgl. Dunlop und Veneu 2019, S. 690). Dearden (1981, S. 38) hält dazu fest: „An immediate difficulty that has to be faced is that *what is meant by ‚controversial' may itself be a matter of controversy* [Hervorhebung des Verfassers]."

Heterogen sind auch die Vorschläge zur Unterteilung in verschiedene Arten von Kontroversen. So differenziert Wazeck (2013, vgl. S. 165) nach den beteiligten Akteuren und Gegenstandsbereichen von Kontroversen in „Kontroversen *in* der Wissenschaft", „Kontroversen *über* die Wissenschaft" und „Kontroversen über die Natur der Wissenschaft". Demgegenüber formuliert Dearden (1981, vgl. S. 38 f.) eine Unterscheidung entsprechend der zugrundeliegenden Ursache einer Meinungsverschiedenheit. Nach Dearden können widersprüchliche Standpunkte entweder auf einen Mangel an Evidenz zur eindeutigen Beantwortung einer Fragestellung, auf eine unterschiedliche Gewichtung von Bewertungskriterien oder darauf zurückgeführt werden, dass keine Einigkeit darüber besteht, welche dieser Kriterien bzw. welche Rahmenbedingungen für das Verständnis einer Fragestellung überhaupt angewendet werden sollten.

Insgesamt zeigt sich, dass der Begriff der Kontroverse nicht wohldefiniert ist (vgl. Freudenthal 2000, S. 126). Die bisher veröffentlichten Definitionsversuche beinhalten zum Teil voneinander abweichende Merkmale und eine etablierte wissenschaftliche Standarddefinition des Kontroversenbegriffes liegt zur Zeit nicht vor. Trotz aller Unterschiede im Begriffsverständnis verschiedener Autoren lassen sich aber dennoch Gemeinsamkeiten in Form spezieller Merkmale einer Kontroverse identifizieren. Um als Grundlage dieser Arbeit eine fundierte Charakterisierung wissenschaftlicher Kontroversen nutzen zu können, werden nachstehend ausführlich entsprechende Literaturfundstellen diskutiert. Darauf aufbauend werden insgesamt sieben verschieden Merkmale zusammengetragen, die als Kriterienkatalog für das Vorliegen einer Kontroverse fungieren sollen. Damit dienen die Merkmale auch dem Zweck, für konkrete Themen bzw. Problemstellungen entscheiden zu können, ob es sich um eine Kontroverse handelt, indem diese sieben Merkmale nachgewiesen werden können. So soll nach Möglichkeit die Frage „Ist das überhaupt kontrovers?" systematisch anhand der hier entwickelten Merkmale zu beantworten sein. Die dafür eigens zusammengestellten und soweit nicht in dieser Weise vorgefundenen Merkmale sind:

(1) verschiedene, miteinander unvereinbare Positionen

(2) argumentativer, kritischer Diskurs

(3) öffentlicher Diskurs

(4) Relevanz für eine bestimmte Personengruppe

(5) Unauflösbarkeit des Konflikts

(6) Einfluss grundlegender Voraussetzungen oder Annahmen

(7) Subjektivität

Im Bemühen um Vollständigkeit werden die vorgeschlagenen Merkmale im Folgenden anhand des Literaturstudiums zum Begriff der Kontroverse einzeln dargestellt, um deren Notwendigkeit und Bedeutung individuell zu erörtern.

(1) verschiedene, miteinander unvereinbare Positionen

Grundlegende Voraussetzung für das Zustandekommen einer Kontroverse ist das Vorhandensein verschiedener, miteinander unvereinbarer Positionen, die von verschiedenen Personen zu einer Thematik vertreten werden. Nehrdich (2011, S. 15) „bezeichnet einen offenen Prozess, der durch mindestens zwei miteinander unvereinbare Standpunkte charakterisiert wird" als Kontroverse. Damit wird nicht nur zentral auf das Bestehen unterschiedlicher Positionen an sich hingewiesen, sondern deren prinzipielle Unvereinbarkeit fokussiert, wie sie auch von Ohl (2013, S. 5) hervorgehoben wird: „Eine ‚Kontroverse' (von lat. contra – gegen, versus), ist dann gegeben, wenn mindestens zwei miteinander unvereinbare Standpunkte vorliegen." Bevor diese wichtige Eigenschaft der Unvereinbarkeit näher skizziert wird, sollen jedoch zwei offensichtlichere Aspekte des Vorkommens unterschiedlicher Positionen beschrieben werden.

Dass eine Kontroverse nur entstehen kann, wenn zwei oder mehr Meinungen zu einer Problemfrage existieren, ist trivial. Allerdings kann als erster Aspekt hervorgehoben werden, dass bei Kontroversen tatsächlich nicht nur zwei gegensätzliche polare Positionen, sondern auch mannigfaltige Standpunkte denkbar sind. Dies wird deutlich, wenn man beispielsweise an die vielfältigen Interpretationen der Quantenmechanik denkt (vgl. Bartelmann et al. 2018, S. 94) oder aber klimafreundliche Möglichkeiten im Bereich Mobilität und Verkehr diskutiert. Unter den Befürwortern von Hybridantrieben, Elektromotoren, Brennstoffzellen oder dem Ausbau des öffentlichen Personennahverkehrs in Städten sowie dem Reisen mit der Bahn finden sich reichhaltige individuellen Meinungen und Lösungsvorschläge.

Der zweite Aspekte betrifft die Anzahl der involvierten Akteure. Prinzipiell genügt zwar eine Meinungsverschiedenheit zwischen lediglich zwei Personen als Ausgangspunkt einer Kontroverse, allerdings kann diese nur initial sein, um im Verlauf eine Bedeutung für eine größere Gemeinschaft zu entwickeln. Demgemäß sprechen Oulton, Dillon und Grace (2004, S. 412) in ihrem ersten Punkt zur Charakterisierung der Natur einer Kontroverse auch von „Gruppen innerhalb der Gesellschaft", die unterschiedliche Standpunkte einnehmen. Das heißt, die strittige Thematik sollte von Relevanz für einen umfangreicheren Personenkreis sein. So kann (aus einer historisch rückblickenden Perspektive heraus) eine solche Gruppe beispielsweise die wissenschaftliche Gemeinschaft der (Quanten-)Physiker sein, welche von einer Debatte zwischen Bohr und Einstein über die Deutung und den Gültigkeitsanspruch der Quantenmechanik (vgl. Garritz 2013, S. 1793 f.) direkt betroffen ist, da Erkenntnisse diskutiert werden, die für diese Gemeinschaft insgesamt bedeutsam sind. Hier kann der eigentliche Ursprung einer Kontroverse durchaus in einem diskursiven Austausch nur zweier Hauptprotagonisten verortet werden. Jedoch wirkt sich der Diskurs zwischen Bohr und Einstein direkt auf die Arbeit der physikalischen Gemeinschaft (z. B. Weiterentwicklung einer Theorie) aus, wodurch auch der Teilnehmerkreis in dieser Diskussion ausgedehnt wird. Einzelne Persönlichkeiten können Initiatoren oder Repräsentanten bestimmter Standpunkte in einer Kontroverse sein. Das bedeutet jedoch nicht, dass die Kontroverse damit nicht auch unmittelbar die Belange einer größeren Gruppe, wie hier beispielsweise die der wissenschaftlichen Gemeinschaft oder anderer Interessengruppen berührt. Dieser Aspekt schlägt sich auch im Merkmal (4) *Relevanz für eine bestimmte Personengruppe* nieder, wie im zugehörigen Abschnitt erläutert wird.

Entscheidendes Kriterium dafür, dass verschiedene Standpunkte in einer Kontroverse münden können, ist jedoch deren Unvereinbarkeit. Gegenstand von Kontroversen sind nach Strad-

ling (1984, S. 121) Probleme, für die gilt: „different groups offer conflicting explanations and advocate conflicting solutions". Zum Entstehen einer Kontroverse müssen die Positionen (hier Erklärungen oder Lösungen eines Problems), welche von den sich gegenüberstehenden Parteien vorgelegt werden, notwendigerweise miteinander in Konflikt stehen (vgl. Venturini 2010, S. 262), sich gegenseitig widersprechen bzw. miteinander nicht vereinbar sein. Die Anerkennung beider Positionen gleichzeitig oder gleichberechtigt ist ausgeschlossen. Kerr et al. (2015, S. 9) sehen darin „große Konflikte", die in Verbindung mit „strittigen Behauptungen über zugrunde liegende Fakten" auftreten können, wodurch Kontroversen Gruppen in der Gesellschaft aufspalten können (vgl. ebd., S. 14), da ein Kompromiss zur Übereinkunft der unterschiedlichen Positionen nicht gefunden werden kann. Die gegenseitige Widersprüchlichkeit von Standpunkten steht demnach im Vordergrund (vgl. Ohl 2013, S. 5), was bedeutet, dass die vertretenen Positionen sich logisch gegenseitig ausschließen. Kontroversen „fordern eine (Neu-)Positionierung heraus" (Nehrdich 2011, S. 16), das heißt, eine Position stellt die Gültigkeit einer anderen in Frage. Auch Kitcher (2000, vgl. S. 23) beschreibt die Beziehung zueinander kontroverser Positionen als gegeneinander herausfordernd und sieht das Aufkommen einer Kontroverse darin begründet, dass ein bestimmter Teil eines bisher bestehenden Konsens (z. B. Ansichten, Erklärungsansätze) von einer Position angezweifelt wird, mit dem Ziel einen neuen Gemeinschaftskonsens zu verhandeln, der diese Position berücksichtigt. Exemplarisch denke man an dieser Stelle an den Widerstreit zwischen geo- und heliozentrischem Weltbild. Die Ansichten dieser beiden Positionen können nicht miteinander in Einklang gebracht werden, da ihre Aussagen grundsätzlich auseinandergehen. Die einst etablierte Weltanschauung, in deren ruhendem Mittelpunkt die Erde als Zentrum aller Bewegung stand, wurde von Entdeckern des heliozentrischen Weltbildes, wie Kopernikus, Galilei oder Kepler herausgefordert. Eine Lösung des Konfliktes und damit ein neuer gesellschaftlicher Konsens konnte erst durch das Bekanntwerden neuer Erkenntnisse und Beobachtungen vorangebracht werden.

An die Unvereinbarkeit knüpfen sich zwei weitere Bedingungen. Zum einen muss die Widersprüchlichkeit von den betroffenen Parteien dargestellt und wahrgenommen werden (vgl. Levinson 2006, S. 1204). Diese Voraussetzung eines Bewusstseins für die gemeinsamen Differenzen ist eng mit den Merkmalen (2) *argumentativer, kritischer Diskurs* und (3) *öffentlicher Diskurs* verbunden. Nur durch ein solches Problembewusstsein, das von den beteiligten Akteuren geteilt wird, kann sich eine Kontroverse manifestieren. Die Beteiligten müssen zumindest darin übereinstimmen, dass eine Unstimmigkeit zwischen ihnen besteht, die nicht unbeachtet oder vermieden werden kann:

> [...] *controversies are situations where actors disagree* [Hervorhebung im Original] (or better, *agree on their disagreement* [Hervorhebung des Verfassers]). The notion of disagreement is to be taken in the widest sense: controversies begin when *actors discover that they cannot ignore each other* [Hervorhebung des Verfassers] [...]. (Venturini 2010, S. 261)

Insofern besteht unter den Vertretern der verschiedenen Positionen Konsens über ihren Dissens, was eine Mindestschnittmenge im Anschauungssystem der Beteiligten notwendig macht. Dieses Grundmaß an Gemeinsamkeit - ein beidseitig akzeptiertes Konzept gewisser Voraussetzungen - auf deren Basis sich die wechselseitige Unvereinbarkeit formulieren lässt, bildet die

zweite Bedingung für zu Kontroversen führender Unvereinbarkeit. Freudenthal (2000, S. 127) drückt dies wie folgt aus:

> A controversy is possible because the competing views are embedded in the same general conceptual scheme, and the very same reason makes the controversy imperative. If two different views belonged to different conceptual schemes, then it would not only be difficult (if at all possible) to communicate, but the different views could not be incompatible. Controversies are called for because the adversaries adopt the same general conceptual system albeit in mutually exclusive interpretations, and it is the sharing of the same general system that renders them possible.

Sind die Weltanschauungen oder Betrachtungsweisen zu weit voneinander entfernt, ist die Schnittmenge gemeinsamer Werte, Anschauungen, Methoden oder Herangehensweisen zu klein, wird keine Kontroverse aus nebeneinanderliegenden Standpunkten erwachsen (siehe Merkmal (6)). Zum Beispiel könnten für die Ursache eines Blitzeinschlages sehr verschiedene Erklärungen vorgebracht werden: Anhänger eines entsprechenden Glaubens oder einer bestimmten Religion könnten möglicher Weise das Wirken einer höheren Macht in der Verantwortung sehen und auf Fügung nach einem göttlichen Willen verweisen. Im Gegensatz dazu würde ein Naturwissenschaftler das Ereignis auf eine kausale Begründung innerhalb einer naturwissenschaftlichen Theorie zurückführen, um das Naturphänomen mithilfe physikalischer Gesetze zu erläutern. Eine wirkliche Kontroverse zwischen Glaubensanhängern und Naturwissenschaftlern wird davon ausgehend in dieser Frage nicht zu erwarten sein, da die naturwissenschaftliche Beschreibungsweise über Modelle, Theorien und Gesetzmäßigkeiten ein Referenzsystem für den Naturwissenschaftler bildet, das der Gläubige in diesem Beispiel nicht teilt. Eine ganz ähnliche Bedingung wie Freudenthal, stellt Dearden (1981, S. 38) auf: „a matter is controversial if contrary views can be held on it *without those views being contrary to reason* [Hervorhebung des Verfassers]“. Dearden spricht in seinem Anspruch an Rationalität als Grundvoraussetzung kontroverser Ansichten von einem „*epistemischen* [Hervorhebung im Original] Kriterium“ (ebd.). Damit spezifiziert Dearden den von Freudenthal vorgebrachten Gedanken einer gemeinsamen Streitbasis, indem die Vernunft den Rahmen einer kontroversen Auseinandersetzung festlegt. Als kontrovers erkennt Dearden nur Standpunkte an, deren Aussagen bzw. Argumente und Gegenargumente von der Vernunft geleitet, also vernunftgemäß sind. Eine rationale Denkart verkörpert nach Dearden das gemeinsame Bezugssystem der verschiedenen Positionen in einer Kontroverse.

Vor dem Hintergrund einer solchen einvernehmlichen Unvereinbarkeit von Positionen ist ein diskursiver Austausch über Gründe, Aussagen, Argumentationen und Schlussfolgerungen innerhalb einer Gruppe oder Gemeinschaft möglich, in dem um die Berechtigung der einzelnen Standpunkte gerungen werden kann. Auf dem Vorhandensein (1) *verschiedener, miteinander unvereinbarer Positionen* baut Merkmal (2) *argumentativer, kritischer Diskurs* direkt auf, wie im Folgenden beschrieben wird.

(2) argumentativer, kritischer Diskurs

Verschiedene Meinungen zu einem streitbaren Thema können nicht als Kontroverse zählen,

solange sie nicht von Vertretern der einzelnen Standpunkte diskutiert werden: „*Controversies are debated* [Hervorhebung im Original]“ (Venturini 2010, S. 262). Das bedeutet, dass die in einer Gruppe vorhandenen, miteinander unvereinbaren Positionen nicht einfach nebeneinander existieren, sondern argumentativ aufeinander bezogen werden müssen, indem sie in der Gruppe diskutiert werden. Würde jeder Meinungsträger eine Position nur für sich einnehmen, ohne diese zu kommunizieren, ohne einem anderen Standpunkt zu widersprechen oder diesen zu kritisieren, läge keine Kontroverse vor. Nicht umsonst hebt Nehrdich (2011, vgl. S. 15) in seiner Definition von Kontroversen hervor, dass sich Positionen untereinander herausfordern. Dafür ist deren Unvereinbarkeit notwendig, aber nicht hinreichend. Erst der öffentliche Diskurs (siehe auch Merkmal (3) *öffentlicher Diskurs*) schafft Kontroversität. Ein fiktives Beispiel: Menschen, die sich für ein Elektroauto entscheiden und wiederum andere, die Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren bevorzugen, könnten voneinander unabhängig aus persönlichen Erwägungen heraus die genannten Fahrzeugmodelle nutzen, ohne im Diskurs miteinander zu sein oder Reibungspunkte aneinander zu finden. Wenn aber die Vor- und Nachteile dieser beiden Varianten nicht nur individuell abgewogen werden, sondern Elektrofahrer die CO_2-Bilanz der Verbrenner beanstanden und Nutzer herkömmlicher benzin- oder dieselgetriebener Autos die kurze Reichweite von Elektroautos kritisieren oder Umweltschäden bei der Produktion der benötigten Batterien hinterfragen, kann eine kontrovers geführte gesamtgesellschaftliche Debatte über die Zukunft der Mobilität entfacht werden.

Ein wichtiges Merkmal kontroverser Auseinandersetzungen ist damit der diskursive Austausch von Argumenten und Gegenargumenten (vgl. McMullin 1987, S. 51), worin Dascal (2006, S. 29) eine „geordnete argumentative Struktur“ erkennt. Zwischen Offenheit einerseits (siehe Merkmal (5) *Unauflösbarkeit des Konflikts*) und einer bestimmten Argumentationsfolge andererseits bildet sich die dynamische Struktur einer Kontroverse, in der „Argumente und Gegenargumente in der Regel nach Relevanzkriterien aufeinander bezogen werden“ (ebd.). Bei seiner begrifflichen Unterscheidung zwischen Diskussion, Disput und Kontroverse betrachtet Dascal (2006, vgl. S. 29) die Möglichkeit, eine Auflösung des Konfliktes durch Überzeugung der anderen Partei zu erreichen (Voraussetzung ist die prinzipielle Bereitschaft zur Meinungsänderung), als ein entscheidendes Abgrenzungskriterium für Kontroversen in Bezug auf Diskussionen oder Dispute. Er bezeichnet dabei den Einsatz von Argumenten, die gegeneinander ausgespielt werden als „Methode“ der Kontroverse, im Sinne eines Weges zur Lösung der kontroversen Fragestellung durch Vergleich der Argumentationen unterschiedlicher Positionen (vgl. ebd. S. 25). In einem solchen Prozess versuchen die verschiedenen Akteure die Vorteile ihrer jeweiligen Anschauungen hinsichtlich deren Erklärungskraft und Widerspruchsfreiheit zu begründen. Aber nicht nur die Verteidigung der eigenen Position, sondern vor allem auch das Aufzeigen der Schwächen anderer Positionen, Zweifel an deren Legitimität, Geltungsanspruch oder Richtigkeit sind Bestandteil von kontroversen Argumentationen (vgl. Freudenthal 2000, S. 127).

Demnach muss die Rolle von Kritik im gegenseitigen Meinungsaustausch besonders betont werden: „‚Critique‘ is an essential component of a ‚controversy‘“ (Freudenthal 2000, S. 127). Darüber hinaus hält Dascal (2006, vgl. S. 22) Kritik für unverzichtbar bei der Genese von Wissen und Erkenntnissen im Allgemeinen. In Argumente eingekleidete Kritik ist jedoch besonders typisch für Kontroversen, da die Protagonisten der Diskussion darlegen, inwieweit die jeweils

andere(n) Position(en) inkorrekt, aber die eigene gültig ist (vgl. McMullin 1987, S. 51). Andere Positionen zu kritisieren, kann bedeuten, dass gemeinhin akzeptierte Sachverhalte in Frage gestellt werden, was nach Venturini (2010, vgl. S. 262) als Ursprung einer Kontroverse angesehen werden kann. McMullin (1987, vgl. S. 52) ergänzt als Bedingung für Kontroversität, dass Seitens der bisher anerkannten Position Argumente erwidert werden müssten, welche die eigenen Ansichten stützen. Wenn jedoch aus Sicht der Herausgeforderten keine Notwendigkeit für eine solche Reaktion besteht (und damit auch nicht erfolgen wird), könne nicht von einer Kontroverse ausgegangen werden. Gemäß Dascal (2006, vgl. S. 29) kann das Infragestellen von Standpunkten auch im Zusammenhang mit einer thematischen Verschiebung oder Ausbreitung der Kontroverse stehen. Somit würden schließlich auch grundlegende Prämissen der verschiedenen Positionen zur Diskussion gestellt werden. Dadurch kann in einer Kontroverse der *Einfluss grundlegender Voraussetzungen oder Annahmen* (Merkmal (6)) auf den Diskurs zu Tage treten.

In Kontroversen verläuft die Diskussion zwischen verschiedenen Positionen stets argumentativ, indem Standpunkte tatsächlich miteinander in Konflikt gebracht werden. Beiderseitiges Kritisieren fordert widerstreitende Argumente in einer kontroversen Auseinandersetzung heraus. Insofern hat es durchaus seine Berechtigung, wie Brante und Elzinga (1990, S. 36) oder Freudenthal (2000, S. 126) von einem „antagonistischen" Verhältnis der unterschiedlichen Positionen in einer Kontroverse zu sprechen, da in gegenseitiger Konkurrenz miteinander um Berechtigung und Gültigkeit der unvereinbaren Standpunkte gerungen wird. In einem derartigen Argumentationsprozess können immer mehr Aspekte einer Ausgangsproblematik einbezogen werden, während auch die Zahl der Akteure immer weiter anwächst (vgl. Venturini 2010, S. 262). Voraussetzung hierfür ist allerdings Merkmal (3) einer Kontroverse: Sichtbarkeit und Zugänglichkeit einer kontroversen Debatte sowie das Entstehen eines *argumentativen, kritischen Diskurses* (Merkmal (2)) sind dabei an die Öffentlichkeit des selbigen gebunden.

(3) öffentlicher Diskurs

Besonders McMullin (1987, vgl. S. 51) betont, dass Kontroversen der Öffentlichkeit bedürfen. In seiner Bestimmung des Kontroversenbegriffes beschreibt McMullin, wie ein kontroverses Thema in einer öffentlichen Form diskutiert werden müsse. Öffentlichkeit meint an dieser Stelle, dass der Diskurs öffentlich, also frei zugänglich für (mindestens) die entsprechende Personengruppe bzw. Gemeinschaft ist, deren Angelegenheiten von der jeweiligen Fragestellung berührt werden. Der Kreis an Personen, für die eine Kontroverse Relevanz besitzt (siehe auch Merkmal (4)), ist abhängig von der konkreten disputierten Problemstellung. Je nach thematischer Domäne(n), in der eine Kontroverse verortet werden kann und je nach Auswirkung auf verschiedene Lebensbereiche Einzelner oder Gruppen von Menschen sind von einer Kontroverse unterschiedliche Personengruppen betroffen. Diese themenspezifische Bedeutung für verschiedene Gemeinschaften kann durch die folgenden beiden Beispiele illustriert werden: Bei der Frage danach, inwieweit Kernkraftwerke in Deutschland zur Deckung des Energiebedarfs der Bevölkerung genutzt werden sollten, ist letztlich jede Bürgerin und jeder Bürger als Konsument der bereitgestellten Energie involviert. Dementsprechend wird die kontrovers geführte Diskussion in Informationsmedien, wie Zeitungen und Nachrichtensendungen, aber auch durch öffentliche Beiträge von Politikern etc. abgebildet, so dass die deutsche Gesellschaft

daran Anteil nehmen kann. Demgegenüber hat eine zum Beispiel naturwissenschaftliche Diskussionsfrage ihren Platz innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft. So werden noch offene, nicht klar zu beantwortende Problemstellungen der Kosmologie, wie die Frage nach dem Ursprung des Universums oder nach der kosmischen Inflation in der Gemeinschaft der Kosmologen behandelt. Wissenschaftler nutzen Tagungen oder publizieren in Fachzeitschriften, um sich über Inhalte kritisch auszutauschen, ihre Schlussfolgerungen und Interpretationen von Daten anderen Wissenschaftlern zugänglich zu machen und verschiedene theoretische Ansätze oder auch experimentelle Methoden zu diskutieren.

Eben dieser, innerhalb einer bestimmten Gruppe, öffentliche Diskurs ist entscheidend für die Sichtbarkeit (vgl. Brante und Elzinga 1990, S. 36) einer Kontroverse unter den Betroffenen. Auch Levinson (2006, S. 1204) charakterisiert Kontroversen als „open and visible“ und verdeutlicht, dass Kontroversität ein „forum for exchange of views“ benötigt. Das Öffentlichsein einer Debatte sichert einen offenen Zugang für all diejenigen, die einen Beitrag zur Klärung der Frage oder Untermauerung bzw. Kritisierung (siehe Merkmal (2)) eines Standpunktes darlegen wollen. Strukturen, die ein solches Forum des offenen Meinungsaustauschs verhindern, unterdrücken Kontroversität. Levinson nennt als Beispiel hierfür einen Schüler, der eine kreationistische Weltsicht vertritt, in der Klasse eines Lehrers, der den Kreationismus ablehnt (vgl. ebd.). Dies ist ein Hinweis darauf, dass auch Machtstrukturen Auswirkungen auf die Entstehung von Kontroversen haben können (vgl. Camicia 2008, S. 300). Die Darstellung verschiedener Standpunkte in einem öffentlichen Rahmen ist so gesehen konstitutiv für Kontroversen. Nur unter der Voraussetzung des öffentlichen Diskurses können verschiedene Parteien mündlich oder schriftlich ihre Argumente darstellen, wodurch sich auch andere Akteure der zugehörigen Personengruppe ein Urteil über diese Positionen bilden können (vgl. McMullin 1987, S. 51). Im obigen Beispiel zum Betrieb von Kernkraftwerken wird deutlich, wie wichtig eine öffentliche Diskussion ist, damit sich Menschen als Wähler eine eigene Meinung in dieser Sache bilden können, welche dann auch das Wahlverhalten beeinflussen könnte. Eine öffentliche Präsentation von Argumenten zum Für und Wider in der Gesellschaft ist bei diesem Entscheidungsfindungsprozess unverzichtbar. Neben dieser Funktion zur Unterstützung individueller Urteilsbildung erfüllt die jeweilige Öffentlichkeit einen weiteren Zweck. Die Gemeinschaft bewertet die konträren Positionen selbst und tritt als Regulativ oder „Richter“ über die verschiedenen Standpunkte auf. Für den Fall wissenschaftlicher Kontroversen hält McMullin (1987, S. 52) beispielsweise fest: „the outcome of the controversy will depend, not just on the actions and arguments of the protagonists but on the response to these of the scientific community generally“. In der wissenschaftlichen Gemeinschaft spielen Peer-Review-Verfahren, die Veröffentlichung kritischer Beiträge zur Arbeit der Fachkollegen und Tagungen, auf denen direkt über Dissens gesprochen und diskutiert werden kann, diesbezüglich eine große Rolle. Die Beispiele zeigen, dass der öffentliche Austausch von Argumenten und Positionen als Basis einer Kontroverse dient. Öffentlichkeit ermöglicht Kommunikation und Partizipation.

Damit schafft der *öffentliche Diskurs* (Mekrmal (3)) auch die Bedingungen für ein viertes Merkmal einer Kontroverse: (4) *Relevanz für eine bestimmte Personengruppe*. Die unmittelbare Verbindung dieser beiden Eigenschaften von Kontroversität wird von McMullin (1987, S. 51 f.) wie folgt skizziert:

> A disagreement, no matter how profound, between two scientists is not enough to constitute a controversy until the terms of their disagreement have been made known to the scientific community. Others are thus enabled to take part. In principle, a controversy is open to everyone who is qualified to understand the issue at stake.

Das heißt, auch wenn eine Kontroverse in der Auseinandersetzung zwischen nur zwei Personen startet, muss der Diskussionsgegenstand für weitere Mitglieder einer Gemeinschaft relevant sein, so dass sie ebenfalls an der Kontroverse teilnehmen und die Streitfrage einen hinreichenden Verbreitungsgrad erreicht.

(4) Relevanz für eine bestimmte Personengruppe

Interdependent verbunden mit dem bereits analysierten Merkmal (3), dass Kontroversen eine im weitesten Sinne öffentliche Plattform benötigen, ist die Frage der Größe und Bedeutsamkeit einer Problemstellung, um überhaupt als Kontroverse eingeordnet werden zu können. Freudenthal (2000, S. 126) formuliert diesen Anspruch zur Geltung als Kontroverse am Beispiel wissenschaftlicher Kontroversen, indem er von einer „discussion over a disagreement *concerning a substantial scientific issue* [Hervorhebung des Verfassers]“ spricht. In ähnlicher Weise sieht McMullin (1987, S. 52) eine Voraussetzung für Kontroversität darin, dass ein Problem einer Gemeinschaft als ernst zunehmend erscheint. Ungeachtet der Stellung eines Akteurs innerhalb der Gemeinschaft genügt es nicht, wenn dieser bis dato konsensfähige Ansichten in Frage stellt, die Gemeinschaft allerdings keinen Anlass zur Reaktion darauf sieht (vgl. ebd.). Im Umgang einer Gemeinschaft mit einer kontroversen Thematik spiegelt sich die Relevanz für sie selbst wider. So gibt es zwar Kritiker, die an Einsteins Relativitätstheorie zweifeln und versuchen ihre Einschätzung fachlich fundiert zu begründen (z. B. Herzig 2019). Folgen allerdings keine Konsequenzen durch die wissenschaftliche Gemeinschaft, beispielsweise in Form publizierter Antworten auf diese Kritik in Fachzeitschriften oder weil die vorgebrachten Kritikpunkte bei der Prüfung durch Mitglieder der Fachgemeinschaft (Peer-Review) nicht bestehen könnten, wird keine wirkliche Kontroverse um die Relativitätstheorie - zumindest nicht unter Physikern - ausgelöst werden.

Da von der prinzipiellen Bedeutung, die eine Fragestellung für eine bestimmte Gruppe hat, abhängen kann, wie viele Mitglieder der Gruppe in eine Diskussion miteinander geraten, verweisen einige Autoren auf die Anzahl der in einer diskursiven Auseinandersetzung involvierten Personen als Indikator für die Klassifizierung als Kontroverse. So kennzeichnen Oulton, Dillon und Grace (2004, S. 411) Kontroversen ganz allgemein mit Blick auf die Zahl der Akteure: „By controversial we mean that *significant numbers of people* [Hervorhebung des Verfassers] argue about them without reaching a conclusion.“ Den Autoren nach muss eine Problematik für eine nicht vernachlässigbare Menge (z. B. einen Teil der wissenschaftlichen Gemeinschaft) an Menschen relevant sein. Unklar bleibt aber, wann genau eine „signifikante Anzahl“ erreicht ist. Auch Levinson (2006, S. 1204) betrachtet eine Problemstellung erst als kontrovers, wenn „it involves a substantial number of people or different groups“. Vermutlich wird hier das Überschreiten einer „kritischen Masse“ als notwendig erachtet, damit der Diskurs von der Gemeinschaft insgesamt wahrgenommen wird und genügend Perspektiven in einer kontroversen Diskussion vertreten werden. Ob allein die reine Anzahl involvierter Personen ausschlaggebend

für Kontroversität ist, bleibt jedoch fragwürdig. In historischen Fallstudien arbeitet Mamiani (2000) den Konflikt zwischen Hook und Newton über die Natur der Farben und Kipnis (2001) die Debatte zwischen Volta und Galvani zum Wesen der Elektrizität als wissenschaftliche Kontroversen auf. Dabei wird jeweils auf den Disput zwischen lediglich zwei Hauptprotagonisten fokussiert. Selbstverständlich hat die Auseinandersetzung dieser Wissenschaftler aber Einfluss auf den Erkenntnisgewinnungsprozess einer größeren wissenschaftlichen Gemeinschaft. Weder Newton und Hook noch Galvani und Volta agieren unabhängig von dieser Gemeinschaft. Im ersten Fall präsentieren sowohl Newton als auch Hook ihre Theorien der Royal Society (vgl. Mamiani 2000, S. 143) und auch die Kontroverse zwischen Galvani und Volta ist nicht auf diese beiden Persönlichkeiten beschränkt (vgl. Kipnis 2001, S. 35, 39). Wichtig ist deshalb eine Unterscheidung zwischen den aktiven Teilnehmern einer Kontroverse, die selbst Argumente oder Gegenargumente in den Diskurs einbringen und den Passiven, die ohne eigene Beiträge aber mit eigenem Standpunkt Anteil am Geschehen nehmen. Kontroversen können an der Oberfläche als Meinungsverschiedenheit einiger weniger repräsentativer Mitglieder einer Gruppe registriert werden, obwohl sie tieferliegend mit erheblicher Reichweite in der gesamten Gruppe verwurzelt sind. Dementsprechend trügerisch ist die Berufung auf eine Mindestanzahl, der in einer Kontroverse handelnden Personen.

Sinnvoller erscheint es, die Relevanz bzw. die Kontroversität einer Thematik nicht nur anhand der Zahl der Involvierten zu messen, sondern die inhaltliche Tragweite sowie die möglichen Auswirkungen auf eine Gruppe von Menschen einzubeziehen. Zweifellos muss bei Kontroversität aber stets von einer übergeordneten Bedeutung für eine Gruppe ausgegangen werden können, statt von einem individuellen Diskussionsbedarf unter einzelnen Personen. Dementsprechend beziehen verschiedene Autoren den Kontroversenbegriff auf Diskurse innerhalb einer Gruppe oder Gemeinschaft von Menschen (vgl. z. B. Kerr et al. 2015, S. 8; Oulton, Dillon und Grace 2004, S. 412; Stradling 1984, S. 121). Welche konkrete Personengruppe von einer speziellen Kontroverse betroffen ist, bestimmt, wie bereits zu Merkmal (3) *öffentlicher Diskurs* erläutert wurde, das genaue Thema. Die Relevanz einer Kontroverse für die gesamte Gemeinschaft erwächst aus einem gemeinsamen Streben, Dissens abzubauen bzw. Konsens aufzubauen. Für wissenschaftliche Kontroversen illustriert Kitcher (2000, S. 29) diesen Gedanken wie folgt:

> All participants, I have claimed, subscribe to a common goal, the production of a maximally unified set of explanations for the broadest possible class of phenomena. Rather than thinking of their proposals as faced with only one type of difficulty, the avoidance of inconsistency, we should recognize the competing claims of the search for unifying explanation.

Für eine Gemeinschaft, deren Ziel die Widerspruchsfreiheit ihrer Theorien und Erklärungen ist, muss die Klärung widersprüchlicher Positionen, wie sie in einer Kontroverse auftreten, eine hohe Priorität haben.

Wie bedeutungsvoll eine Problematik für eine Gemeinschaft ist, kann sich darin zeigen, dass die Akteure selbst eine bestehende Kontroverse konstatieren. Brante und Elzinga (1990, S. 37) setzen sogar ein Bewusstsein der Protagonisten dafür, dass man sich in einer kontroversen Situation befindet voraus: „the involved parties are conscious of the fact that they are part of a

controversy and act in this knowledge“. Äußerungen von Mitglieder einer Gruppe, aus denen hervorgeht, dass man sich selbst als Teil eines kontroversen Diskurses sieht oder einen solchen zumindest beobachtet, sind ein wertvolles Indiz für Kontroversität.

(5) Unauflösbarkeit des Konflikts

Das Merkmal der *Unauflösbarkeit des Konflikts* zwischen den verschiedenen Positionen ist das vielleicht wesentlichste Charakteristikum einer Kontroverse, da es eine deutliche Abgrenzung zu gewöhnlichen Diskussionen über unterschiedliche Standpunkte gestattet. Die Kontroverse unterscheidet sich nach Dascal (2006, vgl. S. 27) gerade dadurch von einer herkömmlichen Debatte, dass es keine Methode gibt, eine Entscheidung zwischen den verschiedenen Standpunkten herbeizuführen. Eine Debatte könne im Gegensatz dazu aufgrund von Beweisen, wie beispielsweise die Durchführung eines Experiments, das Ergebnisse zu Gunsten einer bestimmten Position liefert, aufgelöst werden. Unter Unauflösbarkeit kann also auch *Unentscheidbarkeit* zwischen den unterschiedlichen Positionen in einer Kontroverse verstanden werden. Diese Unentscheidbarkeit gründet, ganz allgemein formuliert, darauf, dass ein Problem „not resolvable by standard means of the discipline involved“ (Freudenthal 2000, S. 126) ist, also ein Diskurs zum Beispiel „nicht einfach durch einen Rückgriff auf Beweise beigelegt werden“ (Kerr et al. 2015, S. 14) kann. Da in diesem Sinne keine adäquate Entscheidungsmethode zur Beantwortung kontroverser Fragestellungen existiert, nennt Dascal (2006, vgl. S. 27) als Möglichkeit, eine Kontroverse zu beenden, die Überzeugung des anderen vom eigenen Standpunkt (siehe Merkmal (2)) oder zumindest eine „Versöhnung von Gegensätzen“ (ebd., S. 25).

Unauflösbarkeit bzw. Unentscheidbarkeit verhindert, dass die Akteure zu einer gemeinsamen Lösung gelangen, was für Oulton, Dillon und Grace (2004, S. 411) eine zentrale Eigenschaft von Kontroversität ist. Venturini (2010, vgl. S. 262) spricht in diesem Zusammenhang von der „Reduktions-Resistenz“ einer Kontroverse. Insofern bleibt eine Kontroverse wegen der Unauflösbarkeit der Unvereinbarkeit verschiedener widerstreitender Standpunkte komplex und offen:

> Da das Problem in einer Kontroverse prinzipiell erweiterbar und wandelbar ist, kann das Ende einer Kontroverse meist nicht darin bestehen, dass eine der Positionen die »Lösung« ist. (Dascal 2006, S. 29)

In dieser Offenheit sieht auch Nehrdich (2011, vgl. S. 16) ein entscheidendes Bestimmungsstück einer Kontroverse. Aufgrund der mangelnden Auflösbarkeit widersprüchlicher Meinungen besitzt eine Kontroverse eine besondere Dynamik. Kontroversen sind prinzipiell offen für neue Argumente, Perspektiven oder thematische Erweiterungen des Problemfeldes (Dascal 2006, vgl. S. 29), so dass sie sich ständig entwickeln können und unter Umständen zu beträchtlicher Größe heranwachsen.

Ihrer Unauflösbarkeit entsprechend zeichnen sich Kontroversen auch aufgrund ihrer Dauer aus. Probleme, die keine überdauernden Unstimmigkeiten bewirken, sondern in kurzer Zeit überwunden werden, gelten nicht als kontrovers (vgl. Brante und Elzinga 1990, S. 37; Freudenthal 2000, S. 126). Kontroversen dauern an, sie sind laut McMullin (1987, S. 51) ein „persistently maintained dispute“. Zeitliche Beständigkeit ist somit als Symptom der Unauflösbarkeit einer Fragestellung zu verstehen. Die einer Kontroverse immanente Unmöglichkeit,

verschiedene Standpunkte miteinander vereinbaren zu können, sorgt dafür, dass der Konflikt anhält und beispielsweise erst nach längerer Zeit durch die Gewinnung neuer Daten oder Erkenntnisse geklärt werden kann.

Obwohl Dearden (1981, vgl. S. 38) fordert, dass die einzelnen Standpunkte, die sich in einer Kontroverse gegenüberstehen, vereinbar mit der Vernunft sein sollen (siehe Merkmal (1)), muss festgehalten werden, dass rationale Begründungen und logische Schlussfolgerungen allein nicht in jedem Fall eine kontroverse Problematik lösen (vgl. Oulton, Dillon und Grace 2004, S. 412). Auf der einen Seite gelingt mithilfe Deardens Kriterium der Rationalität eine wichtige Unterscheidung zwischen kontrovers und nicht kontrovers, wenn beispielsweise die Argumente von Zweiflern der Einsteinschen Relativitätstheorie durch logische, physikalische Gegenargumente entkräftet oder gar durch experimentelle Untersuchungsergebnisse widerlegt werden können. Auf der anderen Seite stellt auch die Berufung auf rationales Denken kein ultimatives Entscheidungsmittel zur Verfügung und gerät so an seine Grenzen. Dascal (2006, S. 29 f.) nutzt deshalb den Begriff „»Weiche« Rationalität (soft rationality)“ und beschreibt diese wie folgt:

> Die rationale Überzeugung (das Ziel der Kontroverse) greift auf Argumentationsarten zurück, die diejenigen überschreiten, die von der deduktiven und induktiven Logik zugelassen werden; zu ihren Rationalitätskriterien gehört alles, was in irgendeiner Hinsicht »vernünftig« ist – nicht nur das Notwendige, auch das Wahrscheinliche; aus diesem Grund ist es eine Rationalität, die auch vom Kontext abhängt, denn Argumente, die in einem gegebenen Zusammenhang rational sind, sind es in einem anderen Zusammenhang vielleicht nicht mehr.

Kontroverse Diskurse sind nicht allein durch Rationalität lösbar - zumindest nicht zwangsläufig - und auch innerhalb der Rationalität kann es zur Unauflösbarkeit einer Meinungsverschiedenheit kommen. Mögliche Ursachen für solche Kontroversen, die trotz vernunftgemäßer Argumentationsstrukturen nicht entschieden werden können, gibt Dearden (1981, vgl. S. 38 f.) selbst an:

- unzureichende Evidenz
- Übereinstimmung in den Entscheidungskriterien, aber nicht in deren Gewichtung
- Uneinigkeit über die Entscheidungskriterien selbst
- Unterschiede im Verständnis („frameworks of understanding“), in (Welt-)Anschauungen oder grundlegenden Lösungsansätzen

Aus dieser Fallunterscheidung heraus ergeben sich zwei Fragen, die ebenfalls die Unauflösbarkeit des Konfliktes zwischen unterschiedlichen Positionen betreffen.

Als erstes stellt sich die Frage, ob eine Kontroverse durch neue Daten, Beweismittel oder Erkenntnisse beigelegt werden kann, wenn sie durch unzureichende Evidenz verursacht wird. Dearden selbst beantwortet diese Frage positiv und sieht keine prinzipiellen Einschränkungen im Lösungspotenzial neugewonnener Evidenz (ebd., S. 38). Eine differenzierte Auffassung zum Einfluss von Evidenz vertritt Levinson (2006, vgl. S. 1204 f.). Er gibt an, dass Definitionen von Kontroversität meist drei Eigenschaften enthalten, darunter auch, dass der Einbezug

neuer Beweise oder Informationen gerade nicht zur Problemlösung führt. Diese Betrachtungsweise sieht Levinson jedoch kritisch und versucht anhand von Beispielen zu belegen, dass Personen ihre Meinung durchaus aufgrund neuer Erfahrungen oder Erkenntnisse ändern können. Wie im Fall eines Menschen, der Krieg prinzipiell billigt, aber seinen Standpunkt aufgrund der Leidensgeschichten von Zeitzeugen und der damit verbundenen Verdeutlichung der immensen negativen Folgen von Kriegen ändern könnte, verdeutlicht Levinson dabei die Rolle von Emotionen und Gefühlen. Diese können nach Levinson zum einen zwar die Neubewertung einer Situation verstärken, aber zum andern auch die Wirkung vorgebrachter Evidenz beeinträchtigen, wenn Menschen „emotionally resistant" (ebd., S. 1205) gegenüber einer vernünftigen Beweislage sind. Zu diesem Bild passend, formulieren Oulton, Dillon und Grace (2004, S. 412), dass „Controversial issues *may be* [Hervorhebung des Verfassers] resolved as more information becomes available". Das heißt, Standpunkte können sich aufgrund neuer Erkenntnisse verändern und so eine Auflösung der Kontroverse bewirken, müssen dies aber nicht zwangsläufig, da weitere Faktoren, wie zum Beispiel Gefühle oder eigene Erfahrungen nicht vernachlässigt werden können. Levinson (2006) diskutiert diesen Aspekt in Bezug auf sogenannte „Socio-Scientific Issues", bei denen individuelle Erfahrungen und Emotionen besonders Einfluss auf die eigene Position nehmen können. Deardens erster Fall, indem Kontroversen aufgrund mangelnder Nachweise entstehen, ist allerdings gerade im Bereich wissenschaftlicher Kontroversen interessant, da hier wissenschaftliche Evidenz eine große Bedeutung für den Erkenntnisprozess besitzt und persönliche Gefühle theoretisch weniger gewichtig in die Meinungsverschiedenheiten unter Wissenschaftlern eingehen sollten. Am Beispiel der Frage nach der Form der Erde wird deutlich, wie geeignete Beobachtungsdaten zwischen Positionen entscheiden können: Auf dem Standpunkt zu beharren, die Erde sei eine flache Scheibe, dürfte vor dem Hintergrund existierender Fotoaufnahmen unseres Heimatplaneten aus dem Weltall schwierig sein.

Deardens Analyse der vier Ursachen für Kontroversen legt als Zweites die Frage nach der konkreten Rolle und Bedeutung von Weltanschauungen sowie tieferliegender Prämissen (Punkt 4) bei der Entstehung von Kontroversen nahe. Inwieweit verschiedene Grundannahmen oder Werte für einen unauflösbaren Konflikt zwischen verschiedenen Standpunkten sorgen und damit Kontroversität begründen können, wird im Folgenden zu Merkmal (6) *Einfluss grundlegender Voraussetzungen oder Annahmen* ausgeführt.

(6) Einfluss grundlegender Voraussetzungen oder Annahmen

Eine besondere Eigenschaft von Kontroversen ist es, dass ausgehend von einer konkreten Problemstellung Folgefragen aufgeworfen werden, die das Problem thematisch verbreitern oder inhaltlich immer weiter vertiefen (vgl. Dascal 2006, S. 25). Infolgedessen können Unvereinbarkeiten verschiedener Positionen ausgehoben werden, die den Dissens auf einer Ebene grundlegender Überzeugungen widerspiegeln. Dascal (2006, S. 29) nennt unter anderem das Hinterfragen von „sachlichen, methodischen und begrifflichen Voraussetzungen des jeweiligen Opponenten" als wesentliches Kennzeichen einer Kontroverse und erkennt darin ein Unterscheidungsmerkmal zu einer nicht kontroversen Diskussion. Anders als in einer gewöhnlichen Diskussion sei die Differenz in einer Kontroverse so umfassend, weil keine Einigung in Bezug auf generelle Voraussetzungen erreicht werde (vgl. ebd., S. 27). Damit einher geht Nehrdich

(2011, vgl. S. 16), der Kontroversen im Kern ebenfalls auf eine Diskrepanz in den Voraussetzungen zurückführt. Divergierende Voraussetzungen können sich beispielsweise in unterschiedlichen Zielen oder Interessen zeigen: In der Debatte um den Klimawandel verfolgen Akteure aus Wirtschaft und Industrie andere Zielstellungen, als Umweltschutzorganisationen und Bewegungen wie „Fridays for Future“. Voraussetzung der Überlegungen und des Handelns ersterer ist der Grundgedanke, Profit zu erwirtschaften (wirtschaftliche Ziele). Demgegenüber verfolgen Letztere vor allem Maßnahmen, die Naturkatastrophen abwenden und Ökosysteme bewahren sollen (Umweltschutzziele). Aus diesen grundverschiedenen Intentionen können in der Folge erhebliche Spannungen und sehr konträre Ansichten zu klimapolitischen Themen resultieren.

Unterschiedliche Voraussetzungen können wiederum die Interpretation von Sachverhalten erheblich beeinflussen. Auch darin sieht Dascal (2006, S. 29) einen Grund für Kontroversität:

> Fragen der Interpretation sind in Kontroversen allgegenwärtig. Interpretationen stehen immer im Verdacht, bestimmte Annahmen zu enthalten, die die Debatte in eine bestimmte Richtung lenken – daraus will natürlich jede Partei Nutzen ziehen. So wird kaum eine Interpretation unhinterfragt akzeptiert und Re-Interpretationen sind die Regel.

Uneinigkeit in der Interpretation von Daten, Belegen, Situationen oder Zusammenhängen kann Ursache von Kontroversität sein, ist aber selbst auch eine mögliche Folge unterschiedlicher Voraussetzungen, auf denen diese Interpretationen beruhen. Sehr kohärent zu Dascal, beziehen sich auch Oulton, Dillon und Grace (2004, S. 411) auf den Einfluss von „key beliefs or understandings about the issue“. Als Merkmal wissenschaftlich kontroverser Fragestellungen geben sie an, dass „interpretations may occur because of the different way that individuals or groups understand or ‘see’ the world (i. e. their worldview)“ (ebd., S. 412). So gesehen, finden sich in diesen „Weltanschauungen“ die unterschiedlichen Voraussetzungen wieder, aus denen sich verschiedene Deutungsmöglichkeiten und letztlich kontroverse Standpunkte ableiten. In einem weiteren Punkt präzisieren Oulton, Dillon und Grace (2004, vgl. S. 412) ihre Überlegungen und führen gegensätzliche Überzeugungen auf Abweichungen im Wertesystem der Akteure zurück.

Wenn Menschen gewisse Wertvorstellungen in strittigen Diskussionspunkten nicht teilen, bietet sich großes Potenzial für die Entstehung von Kontroversen. Eine Frage, wie „Darf man Tiere zum Zweck wissenschaftlicher Forschung töten?“, adressiert tiefliegende Werte, die unvereinbar miteinander in Konflikt geraten können. Insofern hat es seine Berechtigung, dass mehrere Autoren die Grundlage von Kontroversen in Verbindung mit unterschiedlichen Werten bringen (vgl. z. B. Kerr et al. 2015, S. 9; Levinson 2006, S. 1204; Van Rooy 1993, S. 317). Fehlende Wertekongruenz kann laut Stradling (1984, S. 121) Ursache von Kontroversität sein: „different groups offer conflicting explanations and advocate conflicting solutions based on alternative values“. Im Kontrast dazu vertritt Dearden (1981, vgl. S. 39 f.) den Standpunkt, dass Kontroversen nicht notwendigerweise auf unterschiedlichen Werten gründen. Er betrachtet eine unmittelbare Bindung von Kontroversität an Wertstreitigkeiten kritisch und gibt eine Reihe von Gegenbeispielen an, die aufzeigen, dass das Spektrum an Kontroversen darüber hinausgeht:

> But this confinement of the controversial to matters of value is a misconception. Many empirically factual matters can also be controversial, so that having to do with values is by no means a necessary condition. Why did the dinosaurs die out? How is one to explain what look like water-courses on Mars? (ebd.)

Dearden argumentiert weiter, dass Werturteile nicht nur im obigen Sinne keine notwendige Bedingung für Kontroversität, sondern auch keine hinreichende sind. Exemplarisch veranschaulicht Dearden diesen Zusammenhang an einem sehr drastischen Beispiel: Dass jemand, der eine brennende Zigarette auf dem Körper eines Kindes ausdrückt für seine Handlung moralisch verurteilt werden muss (es wird ein Werturteil gefällt), ist klar, ohne dass dies kontrovers diskutiert werden würde (vgl. ebd., S. 40). Werturteile implizieren nicht automatisch Kontroversität. Ob Wertefragen Grundlage von Kontroversen sind, hängt stark vom jeweiligen Themenbereich ab. Deshalb können Fragen mit hoher Affinität zu Moral und Ethik, wie „Dürfen Passagierflugzeuge, die unter Kontrolle von Terroristen sind und beispielsweise auf ein Kernkraftwerk, ein Gebäude bzw. eine große Menschenmenge zusteuern, abgeschossen werden?“, „Darf man Tiere essen?“ oder sogenannte Socio-Scientific Issues (z. B. Anwendung der Präimplantationsdiagnostik) von primär eher wertfreien Kontroversen, wie zum Beispiel häufig bei wissenschaftlichen Problemstellungen, unterschieden werden. Unterschiedliche Werte sind keine Bedingung für Kontroversität, können aber mit ihr in Zusammenhang stehen.

Es ist für Kontroversen charakteristisch, dass sie Unterschiede zwischen den Beteiligten auch auf einer tieferen Ebene grundlegender Annahmen oder Voraussetzungen freilegen, auf denen die unterschiedlichen Positionen basieren. Darin begründet sich auch die Schwierigkeit, eine Lösung in einem kontroversen Diskurs zu erzielen, denn über Voraussetzungen lässt sich nicht immer streiten. Die Prämissen auf denen unterschiedliche Standpunkte aufbauen, können mitunter durch Belege gestützt werden. Ihre Gültigkeit kann dadurch aber nicht zweifelsfrei bewiesen werden. Ob Argumente oder Schlussfolgerungen in einer Debatte berechtigt sind, in dem Sinne, dass sie logisch zutreffend sind, kann objektiv entschieden werden. Für die Annahme der verwendeten Prämissen gilt dies jedoch nicht. Deren Wahrheitswert kann der zentrale Punkt einer kontroversen Meinungsverschiedenheit sein. Hierin kann sich folglich die Unauflösbarkeit des Konfliktes verschiedener Positionen (Merkmal (5)) manifestieren.

Dennoch dürfen Weltanschauungen und die Voraussetzungen, von denen Parteien unterschiedlichen Standpunktes ausgehen, nicht zu verschieden sein (siehe Merkmal (1)). Eine zu große Kluft in den Herangehensweisen und Anschauungen entbehrt einer gemeinsamen Streitbasis und macht einen diskursiven Austausch unmöglich (vgl. Freudenthal 2000, S. 127). Unvereinbare Standpunkte würden dann lediglich nebeneinander existieren, ohne kontrovers untereinander kommuniziert werden zu können. Die Beschreibung von Liebert (2006, S. 144), nach der Positionen in einer Kontroverse „auf verschiedenen Ebenen zugleich im Konsens und Dissens liegen“, wird somit zur Bedingung für die Entstehung einer Kontroverse.

(7) Subjektivität

Ob ein Thema als kontrovers eingestuft wird oder nicht, unterliegt auch subjektiven Faktoren. Eine Fragestellung, die innerhalb einer bestimmten Gruppe kontrovers diskutiert wird, muss längst nicht für jeden eine Kontroverse sein. Camicia (2008, S. 312) betont, dass „in any discussion of whether an issue should be considered controversial or not, we must always ask

‚controversial to who, where, and when?'". Damit identifiziert Camicia drei Einflussgrößen, die letztlich auf Eigenschaften unterschiedlicher Menschen oder Menschengruppen zurückgeführt werden können, also Faktoren, welche die subjektive Wahrnehmung von Kontroversität bestimmen:

- Zeit: Zu welcher Zeit ist ein Thema für Menschen kontrovers?
- Ort: Für Menschen welcher Herkunft ist ein Thema kontrovers? Wo leben die Menschen, für die das Thema kontrovers ist?
- persönliche Einschätzung: Für wen persönlich ist ein Thema kontrovers?

Eine zeitlich stabile, absolute Auffassung von Kontroversität ist nicht haltbar. Die Maßstäbe nach denen sich Kontroversität bemisst sowie die entsprechenden Rahmenbedingungen, wie wissenschaftliche Paradigmen, gesellschaftliche Werte, Prämissen des Denkens, Erkenntnisse und Untersuchungsmethoden, aber auch die Datenbasis, auf denen Meinungen beruhen, unterliegen selbst dem zeitlichen Wandel. Ergo sind einstmals kontroverse Probleme heute gelöst oder durch Neubewertung entschieden, während das, was heute Konsens ist oder als unkritisch gilt, in Zukunft diskussionswürdig werden könnte. Auch Dearden (1981, S. 38), der davon ausgeht, dass kontroverse Standpunkte der Vernunft, der Rationalität genügen müssen, skizziert ein Bild zeitlicher Variabilität:

> By ‚reason' here is not meant something timeless and unhistorical but the body of public knowledge, criteria of truth, critical standards and verification procedures which at any given time has been so far developed. It follows that what at one time is controversial may later be definitely settled, as with many opinions about the nature of the surface of the Moon and the character of the side that faces away from the Earth.

Wie im Abschnitt zu Merkmal (5) *Unauflösbarkeit des Konflikts* erläutert wurde, können eine veränderte Informationslage, neue Daten oder Nachweismethoden eine Aktualisierung von Wissen und Auffassungen bewirken. Entdeckungen und Fortschritt können zusätzliche Evidenz generieren, die klärende Entscheidungen in strittigen Fragen auslösen kann. Kerr et al. (2015, S. 9) sind sogar der Überzeugung: „Nahezu jedes Thema kann an einem bestimmten Zeitpunkt kontrovers werden und jeden Tag entstehen neue Kontroversen." Neben dem Wandel von Gesellschaften können sich außerdem persönliche Werte und individuelle Perspektiven im Laufe eines Lebens verändern und eigene, über die Zeit gesammelte Erfahrungen nehmen Einfluss auf das subjektive Urteil einzelner Menschen. Inwiefern eine Problemstellung für einen bestimmten Menschen oder eine Personengruppe kontrovers ist, muss deshalb vor dem Hintergrund zeitlicher Entwicklungen betrachtet werden.

Zusätzlich zur zeitlichen Einordnung verweisen Brante und Elzinga (1990, vgl. S. 36) auch auf eine örtliche. Menschen in verschiedenen Teilen der Erde unterscheiden sich maßgeblich durch kulturelle Prägungen, Regierungssysteme und ihre lokalen Lebensbedingungen sowie den damit verbundenen Herausforderungen. Die Kontroversität einer Thematik kann sowohl lokal als auch global sehr heterogen bewertet werden (vgl. Kerr et al. 2015, S. 8; Stradling

1984, S. 121). Der Neubau einer Kirche oder Moschee kann je nach Gemeinde oder Region ein besonders streitbares Vorhaben sein. Demgegenüber unterscheidet sich der Umgang mit CO_2-Emissionen nach ganzen Staaten und ist in einigen Gesellschaften Gegenstand reger Diskussionen, in anderen aber kaum relevant. Ebenso weltumspannend sind Fragen der Religion und des Glaubens (vgl. Kerr et al. 2015, S. 8). Dass Themen in Abhängigkeit von Erdteilen, Ländern oder einzelnen Orten kontrovers oder nicht kontrovers behandelt werden, ist oftmals Ausdruck kultureller Einflüsse. Menschen unterscheiden sich aufgrund ihrer Kultur in Einstellungen und Betrachtungsweisen. Deswegen sind individuell verschiedenartige Einschätzungen zur Kontroversität einer Fragestellung denkbar. Orte bestimmen in mancher Hinsicht über die Teilhabe an einer Kontroverse. Deswegen kann man in einigen Regionen mit Problemen durch Rassismus konfrontiert sein, auf die man woanders nie gestoßen wäre. Neben der konkreten Zeit, in der man lebt, bedingt auch der Ort, an dem man lebt, den eigenen subjektiven Blickwinkel auf das Ausmaß an Kontroversität einer Fragestellung.

Letztlich unterliegt die Einordnung einer Kontroverse als solche auch persönlichen Urteilsprozessen. Besonders Nehrdich (2011, S. 16) unterstreicht die Subjektivität als Element von Kontroversen:

> Das Subjekt ist mit einer Kontroverse konfrontiert, dabei entsteht ein Spannungsverhältnis in dem sich beide, die Kontroverse und der/die Beobachter/in, in einem Prozess hervorbringen, verändern und aufeinander beziehen. Eine Kontroverse ist dementsprechend nicht ‚an sich' gegeben, sondern sie wird gemacht und in diesem Vorgang bilden wir uns.

Da Nehrdich das Bestehen einer Kontroverse anhand eines Konfliktes unterschiedlicher Positionen an das Subjekt knüpft, rückt er eine individuelle, personenspezifische Perspektive in den Fokus, unter der eine Kontroverse als solche wahrgenommen werden kann. Menschen können demnach vermeintlich kontroversen Problemen unterschiedliche Bedeutung beimessen: Was für den einen kontrovers ist, kann für den anderen möglicherweise insofern geklärt sein, als dass er seine eigene Position nicht in Frage gestellt sieht. Für Nehrdich (2011, S. 15) wird Kontroversität dadurch definiert, dass „die eigene Position durch (mindestens) eine fremde Position herausgefordert" wird. An dieser Stelle vernachlässigt Nehrdich zum Teil die *Relevanz für eine bestimmte Personengruppe* (Merkmal (4)) zu Gunsten der Stellung des einzelnen Individuums in einer als kontrovers empfunden Situation. Umso wichtiger ist darum, dass beide Merkmale erfüllt sind, wenn von einer Kontroverse ausgegangen werden soll. Selbst wenn ein Thema bedeutsam für eine Gemeinschaft oder Gruppe ist (siehe Merkmal (4)), gilt umgekehrt nicht, dass dieses Thema Gewicht für jeden beliebigen Menschen besitzt. Ausschlaggebend ist der Eindruck subjektiver Relevanz für das Empfinden von Kontroversität. Aus diesem Grund dürfte Dearden (1981, S. 43) zu folgender, prägnanter Schlussfolgerung gelangen:

> The point here is that serious and mature people can be in disagreement precisely over what is controversial, in the epistemic sense. One party regards the matter as definitely known while the other regards it as controversial.

Kontroversität ist somit kein objektiv setzbarer Begriff. Sie ist abhängig von der Wahrnehmung persönlicher Bedeutung, welche allerdings von Person zu Person variieren kann. Subjektivität

spielt - teilweise vermittelt durch Ort und Zeit einer gegebenenfalls streitbaren Problematik - eine entscheidende Rolle für Kontroversen.

Die nach Sichtung der entsprechenden Literatur herausgearbeitet Kennzeichen zur allgemeinen Charakterisierung von Kontroversen dienen in dieser Arbeit als Grundlage. Davon ausgehend, wird im Folgenden eine Präzisierung des Begriffs hin zu *wissenschaftlichen Kontroversen* vorgenommen.

2.1.2 Merkmale wissenschaftlicher Kontroversen

Die große Breite möglicher Themen, die mit prinzipiellen Unsicherheiten behaftet sind, bietet insgesamt eine reichhaltige Diversität an Kontroversen. Aufgrund ihres jeweiligen Gegenstandbereichs weisen Kontroversen Unterschiede hinsichtlich der sieben allgemeinen Merkmale auf. An dieser Stelle werden diese Merkmale für *wissenschaftliche Kontroversen* konkretisiert und genauer beschrieben. Zur Illustration dieser Eigenschaften wird exemplarisch die Problematik bei der Bestimmung des Wertes der Hubble-Konstante in der Astrophysik herangezogen, da sich die Thematik aufgrund ihrer Aktualität besonders eignet. Ein ausführliches Beispiel zum Nachweises der hier genannten Merkmale einer wissenschaftlichen Kontroverse findet sich in Kapitel 3.2 (ab S. 122), in dem der Diskurs um die sogenannte „relativistischen Masse“ als Kontroverse eingeordnet wird.

(1) verschiedene, miteinander unvereinbare Positionen

Bei einer wissenschaftlichen Kontroverse müssen verschiedene wissenschaftliche Positionen zu einer Problemstellung aus dem Bereich der Wissenschaften vertreten werden. Akteure einer wissenschaftlichen Kontroverse sind somit Wissenschaftler, die über „widersprüchliche wissenschaftliche Erkenntnisse und Expertenmeinungen“ (Ohl 2013, S. 5) debattieren. Weitze (2006, S. 151) sieht als Inhaltsbereich solcher Kontroversen „Themen, bei denen in der Wissenschaft keine Einigkeit über die »Fakten« besteht“. Unter „Fakten“ können dabei wahrscheinlich im weitesten Sinne wissenschaftliche Aussagen verstanden werden. Etwas weiter fasst Van Rooy (1993, S. 317) den Begriff wissenschaftlicher Kontroversen:

> Controversial issues in science can loosely be described as those areas of science where the data itself, the collection of data, the empirical evidence or the ethics of the experiment are open to various interpretations and viewpoints.

Dabei beleuchtet Van Rooy teilweise Aspekte der wissenschaftlichen Methodik (Datenerhebung, Dateninterpretation), die ebenfalls Inhalt wissenschaftlicher Kontroversen sein können, wenn zum Beispiel unterschiedliche Standpunkte in Bezug auf das Design einer Studie, das Auswertungsverfahren (z. B. die Anwendung bestimmter statistischer Methoden) oder den Ablauf einer Erhebung bestehen. In einer wissenschaftlichen Kontoverse nehmen unterschiedliche Wissenschaftler also verschiedene Positionen zu wissenschaftlichen Erkenntnissen oder deren Gewinnung ein.

Diese wissenschaftlichen Standpunkte müssen miteinander unvereinbar sein, das heißt, sie müssen einander logisch ausschließen. Auseinandergehende Erklärungen oder Lösungen eines

Problems können beispielsweise auf zueinander nicht kohärenten Theorien beruhen oder zu unterschiedlichen Vorhersagen führen. In der Wissenschaft ist dies jedoch nicht ungewöhnlich, denn auch sie kennt keine absoluten Wahrheiten. Ihre Modelle und Theorien zur Beschreibung der Welt besitzen Grenzen. Insofern ist das Vorkommen miteinander unvereinbarer Positionen in der Wissenschaft natürlich, da die Entwicklung wissenschaftlichen Wissens auf der Veränderung und Anpassung immer neuer Theorien beruht, um die Welt zu beschreiben. Beim Versuch, diese Grenzen zu verschieben, bietet das Angebot verschiedener Erklärungsversuche mit ihren jeweiligen Limitationen Raum für die Entstehung von Kontroversen (vgl. Kitcher 2000, S. 29). Die Unvereinbarkeit muss dabei allerdings stets vereinbar mit den Standards wissenschaftlichen Arbeitens und den Gütekriterien einer Disziplin sein. Die Einigung auf eine prinzipiell wissenschaftliche Betrachtungs- bzw. Herangehensweise sowie die gemeinsame konzeptionelle und begriffliche Basis in Form von Modellen, Theorien und Methoden bildet im Sinne Freudenthals (2000, vgl. S. 127) ein übereinstimmendes Anschauungssystem, innerhalb dessen die Kontroverse stattfinden kann. Auch Deardens (1981, vgl. S. 38) Forderung, dass die einzelnen Standpunkte in einer Kontroverse vernunftgemäß bzw. rational sein sollen, wird damit bereits innerhalb der Wissenschaften erfüllt.

Die Unvereinbarkeit verschiedener wissenschaftlicher Positionen soll hier kurz am Beispiel der Hubble-Konstante H_0 veranschaulicht werden. In jüngerer Zeit ist unter Astrophysikern und Kosmologen eine Debatte um die Ermittlung eines möglichst genauen Wertes für die Hubble-Konstante ausgelöst worden. Davis (2019, S. 1076) spricht dabei in einem in *Science* veröffentlichten Artikel von „one of the most fundamental and controversial measurements in cosmology“. Im Wesentlichen geht es in dieser Kontroverse darum, dass verschiedene Bestimmungsmethoden zu Werten bzw. Wertebereichen führen, die sich signifikant unterscheiden (vgl. Weiss 2020, S. 88). Mithilfe der Cepheiden-Supernova-Entfernungsleiter konnte ein Wert von $74{,}0 \pm 1{,}5\, km s^{-1}\, Mpc^{-1}$ für die Hubble-Konstante ermittelt werden. Nutzt man allerdings Daten zur kosmischen Hintergrundstrahlung in Verbindung mit dem Standardmodell der Kosmologie (ΛCDM), gelangt man zu einem anderen Wert von $67{,}5 \pm 0{,}5\, km s^{-1}\, Mpc^{-1}$ (vgl. Davis 2019, S. 1077; Weiss 2020, S 88). Aufgrund der erreichten Genauigkeiten kann der Unterschied bisher nicht durch systematische Fehler erklärt werden (vgl. Davis 2019, S. 1078), so dass die Messunterschiede als statistisch signifikant betrachtet werden (vgl. z. B. Kenworthy, Scolnic und Riess 2019, S. 145). Um die Widersprüchlichkeit zwischen den verschiedenen Werten aufzulösen, wird an anderen Methoden gearbeitet, die den Gravitationslinseneffekt ausnutzen (Jee et al. 2019). Bisher zeigen die Ergebnisse der verschiedenen Messmethoden jedoch keine Vereinbarkeit miteinander, so dass die Frage der Bestimmung der Hubble-Konstante weiterhin „one of the most intriguing issues in observational cosmology“ (Huang et al. 2020, S. 5) bleibt.

An diesem Beispiel wird deutlich, wie sich die beiden Positionen zur Bestimmung des Wertes der Hubble-Konstante gegenseitig ausschließen und herausfordern, denn es können nicht gleichzeitig beide Ergebnisse gültig sein. So können - typisch für wissenschaftliche Kontroversen (vgl. Kitcher 2000, S. 29) - ursprünglich als Konsens etablierte Erkenntnisse durch neue Daten oder Auswertungsmethoden in Frage gestellt werden. Der Diskurs darüber wird in der wissenschaftlichen Gemeinschaft unter anderem in Fachzeitschriften publiziert und kann damit von der Fachöffentlichkeit bewusst wahrgenommen werden.

(2) argumentativer, kritischer Diskurs und (3) öffentlicher Diskurs

Damit ein wirklicher Diskurs unter Wissenschaftlern über die verschiedenen Standpunkte stattfindet, ist es unabdingbar, gegenseitige Argumente und Kritik offen auszutauschen. Die Kommunikation unterschiedlicher Fachpositionen innerhalb einer Gruppe von Wissenschaftlern bzw. innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft ist gängige Praxis in der Wissenschaft. Auf Konferenzen und vor allem in wissenschaftlichen Fachzeitschriften findet eine beständige Diskussion wissenschaftlicher Ergebnisse statt. Kontroverse Themen müssen an diesen Stellen in der wissenschaftlichen Öffentlichkeit erörtert werden. Gerade Fachzeitschriften (teilweise aber auch sogenannte Preprint-Server, wie z. B. arXiv) bieten solchen Kontroversen eine seriöse Austauschplattform. Wenn Wissenschaftler Artikel, die in der Regel zur Absicherung von Standards einem Peer-Review unterzogen wurden, veröffentlichen, wird damit anderen Experten die Gelegenheit gegeben, die dargestellten Ergebnisse und Zusammenhänge kritisch zu beurteilen. Dies ermöglicht eine Reaktion der wissenschaftlichen Gemeinschaft, in der McMullin (1987, vgl. S. 52) eine Bedingung für Kontroversität sieht. Da die Publikation wissenschaftlicher Erkenntnisse und Einschätzungen auch Voraussetzung für die Partizipation anderer Wissenschaftler an einem kontroversen Diskurs ist, bildet der fachöffentliche Austausch beispielsweise durch Zeitschriftenbeiträge die Basis wissenschaftlicher Kontroversen.

Hier werden logisch argumentierend zum Beispiel Belege in Form neuer Daten dargelegt, die Widerspruchsfreiheit einer Theorie begründet oder die Erklärungsstärke eines Ansatzes untermauert, aber auch Gegenpositionen in Form von Kritik an gezogenen Schlussfolgerungen oder verwendeten Methoden und Modellen eingenommen. Im Kontext der Wissenschaften spielen in diesem Prozess besonders Evidenz, Konsistenz sowie die Umsetzung methodischer Gütekriterien (Validität, Reliabilität, Objektivität) in der Forschung eine Rolle. Wissenschaftler kritisieren die Arbeit bzw. die Ergebnisse anderer nicht einfach aufgrund persönlicher Meinungen oder Befindlichkeiten, sondern auf Basis möglichst objektiver Kriterien. Sachliche, inhaltliche Kritik ist ein zentraler Bestandteil von Wissenschaft. Deswegen ist die selbstkritische Analyse der Grenzen und Möglichkeiten der eigenen Forschungsergebnisse obligatorischer Inhalt in wissenschaftlichen Veröffentlichungen. Im Rahmen dieser Kommunikationsstrukturen ist es eine Voraussetzung von Kontroversität, dass in Fachartikeln und Veröffentlichungen Inhalte auf der Basis wissenschaftlicher Standards von unterschiedlichen Autoren diskutiert werden und dabei gegenseitig aufeinander Bezug genommen wird (vgl. Liebert 2006, S. 144). Das heißt, eine Kontroverse liegt dann vor, wenn verschiedene Wissenschaftler kritisch auf die Arbeiten ihrer Diskussionspartner eingehen und dabei um Erkenntnisse, Schlussfolgerungen oder Theorien ringen.

Ein solcher kritischer, argumentativer wissenschaftlicher Diskurs zeigt sich auch am Beispiel der Kontroverse um den Wert der Hubble-Konstante H_0. Unter Astrophysikern ist hierbei unter anderem strittig, inwiefern die Diskrepanz der verschiedenen Messwerte durch „neue Physik“ erklärt werden könnte, ob die Abweichung überhaupt signifikant ist oder ob es bisher noch unbekannte Fehlerquellen zu berücksichtigen gibt (vgl. Davis 2019, S. 1077; Jee et al. 2019, S. 1134). Im Diskurs um die Hubble-Konstante werden aber vor allem auch Grenzen sowie mögliche Vorzüge unterschiedlicher Messverfahren auf Konferenzen wie der „Cosmic Controversies“ in Chicago (Oktober 2019) unter verschiedenen Wissenschaftlern intensiv diskutiert (vgl. Anderl 2019). Der Austausch zu diesen Messmethoden und Ergebnissen wird in Artikeln

von Fachzeitschriften wie dem *Astrophysical Journal* für die wissenschaftliche Öffentlichkeit kommuniziert (z. B. Freedman et al. 2019; Kenworthy, Scolnic und Riess 2019).

(4) Relevanz für eine bestimmte Personengruppe

Kontroversität in der Wissenschaft erfordert eine hinreichend große Bedeutung für eine Gruppe von Wissenschaftlern. McMullin (1987, vgl. S. 52) betont, dass ein Problem erst dann als wissenschaftliche Kontroverse gelten könne, wenn es für die wissenschaftliche Gemeinschaft auch relevant ist. Diese Bedeutsamkeit resultiert nach Kitcher (2000, vgl. S. 23, 29) im Bereich der Wissenschaften aus dem Ziel, möglichst widerspruchsfreie Erklärungen zu entwickeln. Wissenschaftliche Kontroversen entstehen, so Kitcher, weil verschiedene Lösungen eines Problems von Wissenschaftlern vorgelegt werden, die jeweils nicht vollständig (widerspruchsfrei) sind bzw. ein aktueller wissenschaftlicher Konsens angezweifelt wird, so dass sich Reibungspunkte herausbilden. Entscheidend ist dabei die inhaltliche Reichweite der Fragestellung für die Wissenschaft: Inwieweit betrifft das Problem wesentliche Methoden oder Konzepte einer Fachdisziplin? Wie gravierend ist der Einfluss auf wissenschaftliche Erkenntnisse? Können besonders weitreichende Schlussfolgerungen gezogen werden? Wie schwerwiegend oder nachhaltig sind die möglichen Konsequenzen? Relevanz bedeutet zum einen, dass Kontroversen einen sichtbaren Platz in der öffentlichen, wissenschaftlichen Diskussion einnehmen und in Artikeln, Publikationen sowie auf Konferenzen ein präsentes Thema sein müssen (siehe Merkmale (2) und (3)). Dabei können durchaus einzelne Wissenschaftler als Hauptprotagonisten des wissenschaftlichen Diskurses im Fokus stehen, während die Kontroverse aber Auswirkungen für eine erheblich größere Wissenschaftlergruppe bzw. deren wissenschaftliche Einsichten besitzt. Zum anderen fordern Brante und Elzinga (1990, vgl. S. 37) ein Bewusstsein der Akteure für ihre kontroverse Situation. Das heißt, Kontroversität setzt nicht nur die aktive Diskussion einer Thematik unter verschiedenen Wissenschaftlern voraus, sondern auch die Wahrnehmung eines kontroversen Diskurses durch die wissenschaftliche Gemeinschaft selbst. Die Bedeutung einer Problematik für die Wissenschaft zeigt sich so gesehen auch darin, dass Wissenschaftler selbst zum Beispiel von „einem Problem“, einer „Krise“ oder einer „Kontroverse“ sprechen.

Im Falle der Kontroverse um die Hubble-Konstante verwenden Wissenschaftler beispielsweise selbst Begriffe, wie „controversial measurements“ (Davis 2019, S. 1076), „tension“ (z. B. Kenworthy, Scolnic und Riess 2019, S. 145; Freedman 2017, S. 121) oder „discrepancy“ (z. B. Freedman et al. 2019, S. 35) zur Charakterisierung des momentanen Status der wissenschaftlichen Diskussion. Steinmetz (2020, S. 28) spricht im *Physik Journal* der Deutschen Physikalischen Gesellschaft von einer „Kontroverse“ und „Diskrepanz“, die „nicht einfach aufzulösen ist“. Aber nicht nur das ist bereits ein Hinweis auf die Relevanz oder auch Brisanz des Themas unter Astrophysikern. Die Hubble-Konstante ist ein wichtiger Parameter kosmologischer Modelle. Mit ihrer Hilfe lässt sich nicht nur das Alter des Universums ermitteln, sondern auch, wie schnell es sich weiter ausdehnt (vgl. Davis 2019, S. 1076 f.). Deswegen heben Freedman et al. (2019, S. 34) hervor:

> The Hubble constant (H_0), which parameterizes the current expansion rate of the universe, plays a critical role in cosmology by setting the absolute size scale for the universe.

Darüber hinaus gewinnt die Kontroverse um die Hubble-Konstante dadurch an Gewicht, dass die Unterschiedlichkeit der vorliegenden Werte die Option einschließt, Physik jenseits des Standardmodells der Kosmologie zu entdecken:

> A significant disagreement would provide evidence for fundamental physics beyond the standard model, such as time-dependent or early dark energy, gravitational physics beyond General Relativity, additional relativistic particles, or nonzero curvature. (Riess et al. 2016, S. 56)

(5) Unauflösbarkeit des Konflikts

Wie bereits erläutert, ist die Unauflösbarkeit des Konflikts verschiedener Positionen das vielleicht wesentlichste Merkmal einer Kontroverse, da es eine relativ deutliche Abgrenzung zu gewöhnlichen Diskursen ermöglicht:

> A scientific controversy, however, is not a mere disagreement: it is one that cannot be readily settled by resorting to the commonly accepted disciplinary canons for conducting the relevant inquiry, as these have been developed up to that time. (Baltas 2000, S. 44)

Eine wissenschaftliche Kontroverse zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass die ihr zugrundeliegende Problemstellung nicht durch die vorhandenen wissenschaftlichen Methoden gelöst werden kann (vgl. Freudenthal 2000, S. 126). Das heißt, es stehen keine wissenschaftlichen Verfahren zur Auflösung der Problematik zur Verfügung (vgl. ebd., S. 127), so dass nicht mit Mitteln der Wissenschaft entschieden werden kann, welche Position die angemessenere, die „richtige“ ist. Konkret kann das im Kontext der wissenschaftlichen Arbeitsweise bedeuten, dass es nicht möglich ist, mithilfe von Experimenten, Beobachtungen, mathematischen Beweisen oder allgemein durch logische Schlussfolgerungen eine Entscheidung zwischen den unterschiedlichen Ansichten oder Ansätzen herbeizuführen. Wissenschaftlichen Güte- und Bewertungskriterien, wie Widerspruchsfreiheit, empirische Evidenz, die Anwendung geeigneter, fundierter wissenschaftlicher Untersuchungsmethoden oder die Regeln der Logik bieten keine Grundlage für ein Urteil in der kontroversen Angelegenheit. Im Umkehrschluss folgert Freudenthal (2000, S. 127):

> But in fact, the requirements are farther reaching: if there is or seems to be a way to resolve the disagreement by some available information, or if there exists a recognized method to generate this information, be it by experiment or inference, then the discussion should not count as a controversy.

Der Mangel einer wissenschaftlichen Entscheidungsmethode zur Aufhebung der Unvereinbarkeit der verschiedenen Diskurspositionen ist eine essentielle Bedingung für Kontroversität in der Wissenschaft.

Auch die Hubble-Konstante-Kontroverse erfüllt aktuell diese Eigenschaft. Zur Zeit werden unterschiedliche Messmethoden für die Bestimmung von H_0 genutzt. Wissenschaftler um den Nobelpreisträger Adam Riess beobachten dazu Cepheiden und Supernovae des Typs Ia (Riess

et al. 2016), andere verwenden den Gravitationslinseneffekt (Jee et al. 2019) oder werten die Daten der WMAP-Sonde bzw. des Planck-Teleskops zur Hintergrundstrahlung aus, um mit dem Standardmodell den Wert der Hubble-Konstante zu ermitteln (vgl. Weiss 2020, S. 88) und Forscher wie Wendy Freedman schlagen die TRGB-Methode (Tip of the Red Giant Branch) vor, die auf Messungen an roten Riesen beruht (Freedman et al. 2019). Allerdings gibt es für die Wissenschaftler kein Kriterium, um entscheiden zu können, welche der verschiedenen Messmethoden letztlich geeignet ist, um H_0 zu bestimmen. Die damit verbundene Frage, ob eventuell auch das kosmologische Standardmodell korrigiert werden muss, bleibt laut Freedman et al. (2019, S. 36) dementsprechend offen. Abhilfe könnte eine zukünftige Erhöhung der Messgenauigkeit zum Beispiel bei der Gravitationslinsen-Methode schaffen, um möglicherweise zu einer Entscheidung im Diskurs um den H_0-Wert zu gelangen (vgl. Davis 2019, S. 1077).

Dunlop und Veneu (2019, vgl. S. 689) geben neben dem Fehlen eines wissenschaftlichen Entscheidungsverfahrens einen weiteren Grund für den Ausbruch einer wissenschaftlichen Kontroverse an. Demnach kann der Ausgangspunkt einer wissenschaftlichen Kontroverse auch in unterschiedlichen Annahmen begründet liegen, die sich dann in divergierenden Interpretationen empirischer Daten niederschlagen können. Auch Van Rooy (1993, vgl. S. 317) verortet wissenschaftliche Kontroversen dort, wo Daten (aus Experimenten) von Wissenschaftlern unterschiedlich interpretiert werden können. Über die Akzeptanz bestimmter grundlegender Prämissen wissenschaftlicher Interpretationen kann nicht immer mithilfe der Wissenschaft selbst geurteilt werden. Gerade weil keine eindeutigen Lösungsmöglichkeiten vorhanden sind, kann die Unvereinbarkeit der konfligierenden Standpunkte auf auseinandergehende Grundannahmen oder Voraussetzungen zurückzuführen sein (siehe Merkmal (6)). Eine ähnliche Sicht teilen auch Oulton, Dillon und Grace (2004, S. 412), die folgende Ursachen für Kontroversität unter Wissenschaftlern anführen: „Groups base their views on either different sets of information or they interpret the same information in different ways.“ Somit kann auch die Berufung auf unterschiedliche Ausgangsinformationen oder Voraussetzungen differierende Standpunkte unter Wissenschaftlern bedingen. Insgesamt stehen diese Gründe wahrscheinlich häufig damit in Zusammenhang, dass Kontroversen oft im Grenzbereich des Erkenntnisstandes einer Wissenschaft gefunden werden, wie Borgerding und Dagistan (2018, vgl. S. 284) für „Active Science“-Kontroversen beschreiben.

Die Unauflösbarkeit des wissenschaftlichen Disputs führt auf natürliche Weise dazu, dass eine Kontroverse nicht auf eine Diskussion mit nur sehr kurzer Lebensdauer reduziert werden kann. Deshalb nennt Freudenthal (2000, vgl. S. 126) die Beständigkeit des Konfliktes, der wissenschaftlichen Problemstellung, als Anzeichen einer wissenschaftlichen Kontroverse. Wenn die Diskrepanz bereits nach kürzerem wissenschaftlichen Austausch lösbar wird, könne keine Kontroverse vorliegen, so Freudenthal. Prinzipiell kann eine offene Fragestellung aber in der Zukunft geschlossen werden, wenn beispielsweise durch Fortschritte in der Forschung (z. B. verbesserte Messtechnik) neue Kenntnisse gewonnen werden (vgl. Baltas 2000, S. 45).

(6) Einfluss grundlegender Voraussetzungen oder Annahmen

Unmittelbar im Zusammenhang mit Merkmal (5) steht der Einfluss von Voraussetzungen oder Annahmen, die Wissenschaftler ihren Ergebnissen und Schlussfolgerungen zu Grunde legen. Darum geht Baltas (2000, S. 44) davon aus, dass „scientific controversies occur when disa-

greeing scientists *do not share background ‚assumptions‘* [Hervorhebung im Original]“. Bei der Ergründung der eigentlichen Ursprünge einer wissenschaftlichen Kontroverse können Differenzen in den Ausgangspunkten oder fundamentalen Bedingungen wissenschaftlicher Überlegungen entdeckt werden, auch, wenn hinsichtlich der „Standards“ wissenschaftlichen Arbeitens prinzipiell übereingestimmt wird. In den Wissenschaften können grundsätzliche Unterschiede im Bereich der verwendeten Forschungsmethoden oder bei der Wahl unterschiedlicher Theorien und Modelle zur Beschreibung von Sachverhalten bestehen. Erkenntnisse sind stets theoriegeladen (vgl. z. B. Brewer und Lambert 2001), das heißt, weder das Vorgehen bei experimentellen Untersuchungen, noch Schlussfolgerungen oder die Interpretation von Daten bzw. die Beobachtung von Phänomenen sind voraussetzungsfrei. Überall müssen theoretische Grundannahmen akzeptiert werden, die als Basis wissenschaftlicher Betrachtungsweisen, der Forschung oder auch der Definition von Begriffen, Größen oder Kategorien einer Disziplin dienen. Wie in Merkmal (5) bereits skizziert, können unterschiedliche Voraussetzungen dann auch zu unterschiedlichen und miteinander unvereinbaren Interpretationen führen (vgl. Oulton, Dillon und Grace 2004, S. 412). Da über die Gültigkeit von Grundprämissen oftmals nicht entschieden werden kann, können sie Ausgangspunkt für Kontroversität in der Wissenschaft sein. Bei diesen Grundvoraussetzungen wird es sich im Unterschied zu überfachlichen Problemstellungen (Socio-Scientific Issues) in den meisten Fällen nicht um voneinander abweichende (moralische) Werte handeln. Diese werden für rein fachwissenschaftliche Inhalte häufig eine untergeordnete Rolle gegenüber theoretischen Annahmen oder methodischen Vorüberlegungen spielen.

Im Beispiel zur Messung der Hubble-Konstante könnten, wie erläutert, die theoretischen Voraussetzungen auf denen das Standardmodell der Kosmologie basiert, letztlich ursächlich für die entstandene Kontroverse unter den Astrophysikern sein (vgl. Jee et al. 2019, S. 1134). Auf der anderen Seite ist es aber auch möglich, dass Fehlerquellen identifiziert werden, die aufgrund der bisher erreichten Genauigkeiten ebenso tiefliegend verborgen wären (vgl. Davis 2019, S. 1077). In jedem Fall könnten Effekte elementarer Annahmen auf die derzeitigen Messergebnisse entdeckt werden, über die man heute noch im Unklaren ist, die aber die derzeitige Unvereinbarkeit der verschiedenen Wertebereiche für H_0 erklären könnten.

(7) Subjektivität

Auch wissenschaftliche Kontroversen besitzen ein subjektives Moment. Im Gegensatz zur Charakterisierung einer Kontroverse im Allgemeinen werden allerdings Ort und Herkunft von Wissenschaftlern vermutlich ein vernachlässigbarer Faktor für Subjektivität sein. Da sich Wissenschaft um Internationalität, Objektivität und die Reproduzierbarkeit ihrer Ergebnisse unabhängig vom Forschungsstandort bemüht, treten Kultur und lokale Verhältnisse in den Hintergrund. Selbstverständlich ist jedoch, dass Kontroversität in der Wissenschaft nicht zeitlos ist. Mit dem technischen Fortschritt verbessern sich sowohl Untersuchungs- als auch Auswertungsmethoden. Größere Datenmengen oder eine höhere Güte des Datenmaterials können empirische Nachweise ermöglichen, die Theorien und Modelle verändern. Die darauf aufbauende Weiterentwicklung des wissenschaftlichen Wissens durch neue Konzepte oder sogar ganze Paradigmenwechsel lässt immer wieder eine Auflösung wissenschaftlicher Kontroversen zu, so dass einstmals vorhandene Diskurse bis heute entschieden wurden und aktuell bestehende

Diskussionen in Zukunft geklärt werden könnten.

Zwar kann im Fall der Hubble-Konstante momentan keiner der verwendeten Messmethoden der Vorrang gewährt werden (siehe Merkmal (5)), was aber nicht ausschließt, dass mit einer Verbesserung dieser Methoden oder auf dem Gebiet der Theorieentwicklung Fortschritte erzielt werden können, die das Rätsel des H_0-Wertes lösen. Beispielsweise könnten mit der Gravitationslinsen-Methode neue Einblicke in die Diskrepanz gewonnen werden (vgl. Davis 2019, S. 1077).

Obwohl es ein Ziel der Wissenschaft ist, ihre Entdeckungen und Schlussfolgerungen möglichst unabhängig von subjektiven Eindrücken oder Meinungen zu produzieren, ist Subjektivität dennoch ein fester Bestandteil des Erkenntnisprozesses:

> Scientists' theoretical commitments, beliefs, previous knowledge, training, experiences, and expectations actually influence their work. All these background factors form a mind-set that affects the problems scientists investigate and how they conduct their investigations, what they observe (and do not observe), and how they make sense of, or interpret their observations. (Lederman 2007, S. 834)

Somit können auch Wissenschaftler immer nur eine persönliche, subjektive Perspektive auf wissenschaftliche Themen und Fragen einnehmen. Hinzu kommt, dass für den einzelnen Wissenschaftler betrachtet, die Problematik einer Kontroverse auch individuell relevant sein sollte. Der subjektive Grad an Kontroversität einer Thematik kann von Wissenschaftler zu Wissenschaftler variieren. Im Extremfall ist das, was für den einen Fachexperten kontrovers ist, für den anderen ein gelöstes Problem (oder umgekehrt), da maßgeblich ist, ob der eigene Standpunkt eines Wissenschaftlers durch den eines anderen ausreichend erschüttert wird. Wenn ein Wissenschaftler aus tiefer Überzeugung die fachwissenschaftliche Position (z. B. die Interpretation experimenteller Ergebnisse) eines Kollegen ablehnt, sie als „falsch" oder unhaltbar beurteilt, wird sich dieser Wissenschaftler nicht als Teil einer Kontroverse verstehen, sondern die Sachlage als geklärt und klar entschieden wahrnehmen. Wäre es umgekehrt nicht möglich, dass Wissenschaftler an einem sonst breit etablierten Konsens zweifeln und eine Frage entgegen der Grundhaltung der wissenschaftlichen Gemeinschaft als kontrovers betrachten, wäre wissenschaftlicher Fortschritt häufig nicht möglich. Neue wesentliche Erkenntnisse werden häufig dadurch gewonnen, dass Wissenschaftler untereinander konträre Meinungen vertreten, die möglicherweise auch auf die Kontroversität einer Fragestellung gerichtet sind. Wichtig wird also stets sein, inwieweit ein Wissenschaftler den Status einer wissenschaftlichen Theorie, Erkenntnis oder Interpretation in Frage gestellt sieht.

Verschiedene Arten wissenschaftlicher Kontroversen

Abschließend sollen unterschiedliche Arten einer wissenschaftlichen Kontroverse vorgestellt werden, um eine genauere Differenzierung vorzunehmen. Der Begriff *wissenschaftliche Kontroverse* wird zwar von unterschiedlichen Autoren (z. B. Baltas 2000; Freudenthal 2000; Kitcher 2000; McMullin 1987; Van Rooy 1993; Weitze 2006) in ähnlicher Weise verwendet, jedoch ist eine detailliertere Sichtweise zweckmäßig, um vor allem zwischen innerfachlichen und domänenübergreifenden Kontroversen zu unterscheiden.

Borgerding und Dagistan (2018, vgl. S. 283-286) teilen wissenschaftliche Kontroversen in drei verschiedene Arten ein: *Active Science*, *Societally Denied Science*, *Socio-Scientific Issues*. Unter *Active Science* zählen Kontroversen, wenn sie nur innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft stattfinden. Entsprechende Problemstellungen fragen, laut Borgerding und Dagistan, nach der Erklärungskraft und Vereinbarkeit einer wissenschaftlichen Erklärung mit den empirischen Daten. Vor allem aktuelle Themen und Bereiche, in die Wissenschaft neu vordringt, zählen in diese Kategorie. Borgerding und Dagistan nennen hier die Stringtheorie als Beispiel. *Societally Denied Science* umfasst Themen, die in der wissenschaftlichen Gemeinschaft, also unter Wissenschaftlern selbst unstrittig und nicht kontrovers sind, aber von Teilen der Gesellschaft als streitbar angesehen werden. Eine mögliche Fragestellung ist dabei, ob ein Sachverhalt überhaupt als Wissenschaft zählt oder eine wissenschaftliche Grundlage besitzt. Exemplarisch verweisen Borgerding und Dagistan hierzu auf Themengebiete wie die Evolution oder die Verursachung des Klimawandels durch den Menschen, die auch Meinungen von Wissenschaftsleugnern provozieren. Auch *Socio-Scientific Issues* haben ihren Platz in der Gesellschaft, beziehen neben der Wissenschaft als zentralen Ausgangspunkt aber auch Aspekte der Ethik, Politik, Ökonomie oder auch Religion mit ein. Solche Fragestellungen können nicht allein mit den Verfahren der Wissenschaft beantwortet werden, da sie beispielsweise eine Metaperspektive auf die Anwendung wissenschaftlichen Wissens oder bestimmter Technologien erfordern. Infrage stehen beispielsweise Gerechtigkeit, Sicherheit oder gesellschaftlicher Nutzen wissenschaftlich-technologischer Errungenschaften. In der Bandbreite dieser Kontroversen lassen sich unter anderem Fragen zur Stammzellforschung, zum Klonen oder zur Energiegewinnung durch Kernkraftwerke einordnen.

Wazeck (2013, vgl. S. 165) grenzt *Kontroversen <u>in</u> der Wissenschaft*, die in der Gemeinschaft der Wissenschaftler zur Klärung einer ungelösten wissenschaftlichen Fragestellung (vor allem auch innerhalb einer Fachdisziplin) ausgetragen werden von *Kontroversen <u>über</u> die Wissenschaft* und *Kontroversen über die Natur der Wissenschaft* ab. *Kontroversen über die Wissenschaft* gehen über die Perspektive einzelner wissenschaftlicher Domänen hinaus und involvieren möglicherweise Protagonisten aus Politik oder Wirtschaft und betreffen auch Fragen der Ethik, wodurch eine zunächst wissenschaftliche Problemstellung auf die Gesellschaft insgesamt erweitert wird. Als Beispiele hierfür werden von Wazeck der Klimawandel und die Veränderung von Nahrungsmitteln durch Gentechnik angeführt. Bei *Kontroversen über die Natur der Wissenschaft* bestehen nicht nur unter Wissenschaftlern, aber gerade auch unter ihnen Reibungspunkte in Bezug auf zugrundeliegende Annahmen oder Voraussetzungen, die das Wesen der Wissenschaft als solche betreffen. Diese Klassifizierung wird später von Dunlop und Veneu (2019) aufgegriffen, die unter *Kontroversen über die Wissenschaft* im Wesentlichen *Socio-Scientific Issues* zählen. Deutliche Parallelen weisen auch *Kontroversen in der Wissenschaft* mit Borgerdings und Dagistans *Active Science*-Kontroversen auf. Dunlop und Veneu (2019, S. 690) selbst nähern sich der Definition von *Active Science*, da sie *Kontroversen in der Wissenschaft* als „live, or current“ beschreiben.

Eine Einteilung, wie sie von Borgerding und Dagistan, Wazeck oder Dunlop und Veneu vorgenommen wird, ist wichtig, um Themenbereiche und die beteiligten oder betroffenen Akteure einer Kontroverse klarer festlegen zu können. Die verschiedenen Standpunkte, auf die sich ein unauflösbarer Konflikt bezieht, können sehr unterschiedlichen Disziplinen oder Schu-

len zugeordnet werden und mitunter komplexer Natur sein. Bezogen auf die Physik ist es möglich, dass Kontroversen mit zunächst fachwissenschaftlicher, inhaltlicher Perspektive beispielsweise in den Bereich ethischer, medizinischer, ökologischer, ökonomischer, gesellschaftlicher oder politischer Fragen vordringen. Exemplarisch sei hier die Debatte um den Einsatz erneuerbarer Energien oder die Bewertung der Nutzung der Kernenergie genannt. Diese Art domänenübergreifender, komplexer Kontroversen, die auch als *Socio-Scientific Issues* bezeichnet werden, sollen nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit sein, sondern *Kontroversen <u>in</u> der Wissenschaft* bzw. *Active Science*. Hierbei wird sich auf *Kontroversen <u>in</u> der Physik* fokussiert, also wissenschaftliche Kontroversen zwischen fachphysikalisch strittigen Positionen, die möglichst frei von außerdisziplinären Erwägungen der Politik, Gesellschaft, Wirtschaft, Umwelt, Medizin oder der Moral sind. Damit sollen unter wissenschaftlichen Kontroversen explizit nicht *Socio-Scientific Issues* wie beispielsweise bei Van Rooy (1993, vgl. S. 317) mit inbegriffen sein. Diese Einschränkung dient einer zweckmäßigen Reduzierung der Komplexität, da schwerpunktmäßig Vorstellungen, die Physik als Fachwissenschaft betreffend und unabhängig von Vernetzungspunkten mit anderen Disziplinen, untersucht werden sollen. Eine wissenschaftliche Kontroverse in der Physik kann in diesem Sinne zum Beispiel die Diskussion um den Wert und die Bestimmung der Hubble-Konstante H_0 sein, wie in diesem Kapitel näher beleuchtet wurde.

2.2 Der Bildungswert wissenschaftlicher Kontroversen für den Physikunterricht

2.2.1 Beitrag zur *Scientific Literacy*

Wissenschaftliche Kontroversen besitzen für den Physikunterricht einen besonderen Bildungswert, da sie einen Beitrag zur naturwissenschaftlichen Bildung der Schüler leisten, welche wiederum zu gesellschaftlicher Teilhabe und selbstständiger Urteilsbildung befähigen soll (vgl. KMK 2005, S. 6; KMK 2020, S. 8). In diesem Kapitel wird allgemein der Beitrag wissenschaftlicher Kontroversen zur *Scientific Literacy* der Lernenden aufgezeigt.

Entsprechend der Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss soll Physikunterricht im Sinne einer naturwissenschaftlichen Grundbildung die Basis für „eine aktive Teilhabe an gesellschaftlicher Kommunikation und Meinungsbildung über technische Entwicklung und naturwissenschaftliche Forschung“ (KMK 2005, S. 6) legen. Als eines der wesentlichen Ziele des Physikunterrichts wird die Befähigung der Lernenden zur „Bewertung physikalischer Sachverhalte in fachlichen und gesellschaftlichen Kontexten“ (ebd., S. 8) gesehen. In den Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife wird festgehalten, dass „naturwissenschaftliche Kompetenz“ Voraussetzung für „eine verantwortungsvolle gesellschaftliche Teilhabe“ (KMK 2020, S. 8) ist, da vor allem im Hinblick auf die Anwendungsbereiche der Naturwissenschaften Urteilsvermögen und Folgenabschätzungen von Bedeutung sind. Naturwissenschaftliche Kompetenz beinhaltet dabei unter anderem „eine Metaperspektive auf die Denk- und Arbeitsweisen der Naturwissenschaften“ sowie insbesondere,

> [...] naturwissenschaftliche Sachverhalte fachsprachlich auch unter Verwendung von Mathematisierungen und fachtypischen Repräsentationsformen darzustellen, zu präsentieren, *zu diskutieren, zu bewerten sowie naturwissenschaftlich zu argumentieren und damit am gesellschaftlichen Diskurs teilhaben zu können* [Hervorhebung des Verfassers]. (ebd.)

Bei der Erreichung dieser Bildungsziele können wissenschaftliche Kontroversen einen wichtigen Beitrag leisten und möglicherweise helfen, das Interesse an naturwissenschaftlichen Themen zu steigern (vgl. Kipnis 2001, S. 33; Van Rooy 1993, S. 317). Zum einen ermöglichen sie im Sinne einer „Metaperspektive“ ein adäquates Bild über die Natur der Naturwissenschaften zu vermitteln. Dieses ist nach Höttecke und Hopf (2018, S. 273) wiederum notwendig, um kompetent mit naturwissenschaftlichen Argumenten umgehen zu können und schließlich auch in davon ausgehenden politischen Fragen entscheidungs- und disskussionsfähig zu sein. Zum anderen sind die Beurteilung, Reflexion und Diskussion naturwissenschaftlicher Wissensbestände für die Entwicklung kritisch denkender Heranwachsender vor dem Hintergrund gesellschaftlicher Partizipation besonders bedeutsam (vgl. Schindler, Lehnen und Jakobs 2006, S. 82). Wissen in und über die Naturwissenschaften zu vermitteln, gehört zum Umfang einer *Scientific Literacy*, die Fähigkeiten einschließt, „am gesellschaftlichen Diskussionsprozeß entscheidungsrelevant teilnehmen zu können“ (Fischer 1998, S. 41). Hierzu müssen Lernende Diskurse als wesentlichen Teil naturwissenschaftlichen Arbeitens erkennen (vgl. ebd. S. 42)

und sensibel für die Natur von Kontroversen sowie den Gebrauch unterschiedlicher Argumente sein, „to be fully scientifically literate“ (Oulton et al. 2004, S. 489).

Im „Mündig-Werden des Subjekts“ sieht Nehrdich (2011, S. 15) einen erheblichen Wert von Kontroversen im Unterricht. Kontroversität allgemein, also die diskursive und mehrperspektivische Auseinandersetzung mit kontroversen Themen, habe eine „hohe Bedeutung für Bildungsprozesse“ (ebd.). Aus einer vergleichbaren Sicht argumentiert Ohl (2013, S. 7) für einen „fundamentalen Bildungswert“ der Beschäftigung mit Kontroversen. Dieser liege maßgeblich in der Anwendung des aus der politischen Bildung bekannten Kontroversitätsprinzips verankert, welches besagt, dass in Wissenschaft oder Politik kontroverse Themen auch im Schulunterricht in ihrer Kontroversität behandelt werden müssen. Damit sei Unterricht „ehrlicher“ und vermeidet „Manipulation der Schüler durch zu einseitige Darstellungen“ (ebd.). Einen derartigen Zusammenhang zwischen Kontroversität im Unterricht und der Heranbildung kritisch denkender, selbstständig urteilender, diskursfähiger junger Erwachsener beschreiben auch Niendorf und Reitz (2019, vgl. S. 1-3): Kontroversitätsprinzip und Überwältigungsverbot (Lehrkräfte dürfen ihre Schüler nicht mit der eigenen Meinung „überwältigen“; Indoktrinationsverbot), welche als Bestandteile des sogenannten „Beutelsbacher Konsens“ Grundpfeiler in der politischen Bildung sind, sollen dafür Sorge tragen, dass Schüler möglichst selbst- und eigenständig zu Urteilen gelangen können. Sich so entfalten könnende Urteilsfähigkeit ist eng verbunden mit der Nutzung des Rechts auf eine eigene Meinung und der Ausübung von Meinungsfreiheit. Darum „sollte Unterricht grundsätzlich einen offenen Meinungsaustausch fördern“ (ebd., S. 3) und dementsprechend notwendige Diskursfähigkeiten entwickeln helfen.

In der Auseinandersetzung mit kontroversen Themen lassen sich damit auch kommunikative bzw. argumentative Fähigkeiten stärken, da Gelegenheiten zum Diskurs und Anlass für fachbezogene Diskussionen zwischen den Lernenden geboten werden (vgl. Stradling 1984, S. 123). Dadurch können Multiperspektivität und ein offener fachlicher Austausch gewährleistet werden, um Kontroversität zu realisieren, denn gemäß des Kontroversitätsprinzips sollen wissenschaftliche Kontroversen auch im Unterricht als kontrovers dargestellt werden. Vermittels eines diskursiven Zugangs im Sinne dieses Kontroversitätsprinzips können vor allem auch Fähigkeiten im fachlichen Argumentieren geschult werden, die eine naturwissenschaftliche Grundbildung enthalten sollte (vgl. Dascal 2006, S. 36; Garritz 2013, S. 1800). Weitze und Liebert (2006, S. 9) geben an, dass kommunikative Kompetenzen in Bezug auf die Wissenschaft erfordern, „auch die kontroverse Struktur aktueller wissenschaftlicher Debatten nachvollziehen zu können“. So sollten Lernende unterstützt werden, häufig als selbstverständlich akzeptierte Annahmen zu hinterfragen und Schwachstellen in Argumentationen kritisch zu analysieren (vgl. Scott, Richards und Martin 1990, S. 474). In Situationen, in denen zu einem Fachinhalt unterschiedliche Positionen vorgefunden werden, müssen die stützenden Belege und Begründungen dieser Fachpositionen kritisch geprüft werden. Darüber hinaus können Lernende Erfahrungen in der Toleranz gegenüber nicht geteilten fremden Meinungen sammeln (vgl. Garritz 2013, S. 1800).

Hedtke (2002, S. 174) folgert aus dem Kontroversitätsprinzip weiter, dass „Wissenschaft als inhaltlich und methodologisch kontroverser Prozess verstanden“ werden müsse. Aus dieser Perspektive heraus können wissenschaftliche Erkenntnisse immer nur unter dem Aspekt der Vorläufigkeit dargestellt werden (ebd.). Dillon, Grace und Oulton (2004, S. 3) verweisen

ebenfalls auf die Notwendigkeit, die Kontroversität wissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung im Unterricht abzubilden, um den Ansprüchen naturwissenschaftlicher Bildung an ein Verständnis der Naturwissenschaften als solche gerecht werden zu können:

> But a relevant science education, an understanding of how science makes knowledge and of its limitations – what some might call 'scientific literacy' – cannot be developed without an appreciation of the nature of science. A science education that shied away from teaching about the controversial nature of several key issues in contemporary society would be ethically bankrupt.

Scientific Literacy impliziert eine Auffassung zur Produktion und zum Status wissenschaftlichen Wissens, zu der auch Kontroversen als natürlicher Bestandteil des wissenschaftlichen Arbeitsprozess gehören. Fehlt diese Einsicht, kann dies zu erheblichen Missverständnissen führen, wenn in der Gesellschaft Uneinigkeit und Meinungsverschiedenheiten unter Wissenschaftlern als Defizit verstanden wird. Verschiedene wissenschaftliche Positionen werden unter Umständen in einer unangemessenen Konkurrenz zueinander dargestellt, um einzelne Wissenschaftler oder die Leistung der Wissenschaft insgesamt zu diskreditieren, weil die Ansicht besteht, dass in der Wissenschaft nur eindeutige, absolute Wahrheiten existieren müssten (vgl. Weitze und Liebert 2006, S. 10). Damit laufen wissenschaftliche Erkenntnisse insgesamt Gefahr, eine unangemessene Relativierung zu erfahren. Wenn ohne Sensibilisierung für Kontroversität in den Wissenschaften einander gegenüberstehende, unterschiedliche wissenschaftliche Erkenntnisse in der öffentlichen Diskussion präsentiert werden, kann ein Eindruck von Beliebigkeit entstehen, der die Relevanz solcher Erkenntnisse untergräbt. Daraus resultiert möglicherweise Verunsicherung und eine nicht hinreichende Beachtung wissenschaftlicher Aussagen in der Gesellschaft. Kontroversen seien laut Weitze und Liebert (2006, S. 12) deswegen sowohl aus didaktischer Sicht ein „Schlüssel zur Wissenschaft“, um diese an sich für Lernende zu erschließen, als auch unter politischen Gesichtspunkten betrachtet, um Zugang und Teilhabe an wissenschaftlichem Wissen für die Gesellschaft zu ermöglichen. Auch Cross und Price (1996, vgl. S. 319) thematisieren den Bedarf eines schulischen Umgangs mit kontroversen wissenschaftlichen Problemfeldern, der Schüler später in die Lage versetzt, an der Diskussion und Lösung solcher Fragen partizipieren zu können. Reis und Galvão (2004, S. 1623) fassen die diesbezügliche Aufgabe schulischen Unterrichts treffend wie folgt zusammen:

> In this manner, school can have a decisive role in promoting: (a) an understanding of science and of scientists' work, that allows students to recognize what is at stake in a given controversy, reach an informed opinion and participate in discussions, debates and decision-making processes; and (b) the construction of a democratic society where the decisions concerning scientific and technological issues are not made exclusively by specialists.

Insofern ist Kontroversität in der Wissenschaft als ein Aspekt naturwissenschaftlicher Grundbildung bzw. *Scientific Literacy* essentiell und ermöglicht den kompetenten Umgang mit wissenschaftlichen Kontroversen im Kontext einer Fachdisziplin sowie im gesellschaftlichen Austausch in Bezug auf wissenschaftliche Erkenntnisse.

Scientific Literacy beinhaltet zusätzlich ein adäquates Verständnis der Lernenden im Bereich von *Nature of Science* (Holbrook und Rannikmae 2009; Brewer und Lambert 2001). Auch in

den Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife wird neben einer vertieften Allgemeinbildung und Studierfähigkeit die Wissenschaftspropädeutik als Ziel des Physikunterrichts angesehen (vgl. KMK 2020, S. 8). Zur Erreichung dieser Bildungsvorgabe und der angestrebten *Scientific Literacy* der Lernenden müssen im Unterricht Einsichten zu wissenschaftlichen Arbeitsweisen, aber auch Kenntnisse über die Natur der Physik als Naturwissenschaft ermöglicht werden. Zeidler et al. (2005, S. 361) heben bei der Behandlung wissenschaftsbasierter, komplexer Kontroversen (Socio-Scientific Issues) im Unterricht „nature of science issues" als einen wichtigen Aspektbereich hervor. Entsprechende unverzichtbare Einblicke in den Erkenntnisgewinnungsprozess der Naturwissenschaften können auch mithilfe wissenschaftlicher Kontroversen gewonnen werden. Tatsächlich könnten wissenschaftliche Kontroversen hierbei sogar einen Vorteil gegenüber den Socio-Scientific Issues besitzen. In einer Studie mit 21 Universitätsprofessoren fanden Bell und Ledermann (2003, vgl. S. 370) heraus, dass die Entscheidungsfindung der Befragten bei der Auseinandersetzung mit verschiedenen Socio-Scientific Issues nicht von deren *Nature-of-Science*-Konzepten abhängig war. Eine überwiegende Rolle spielten allerdings die persönlichen Wertevorstellungen der Teilnehmenden. Weil wissenschaftliche Kontroversen im Gegensatz zu Socio-Scientific Issues nicht unmittelbar auf ethische bzw. gesellschaftliche Fragen fokussieren, könnte sich dies positiv bei der Konzentration auf *Nature-of-Science*-Aspekte auswirken.

Da Kontroversen zwischen Wissenschaftlern ein unentbehrliches Element wissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung und des Fortschritts in den Naturwissenschaften sind (vgl. z. B. Dascal 2006, S. 36; Garritz 2013, S. 1787; Machamer, Pera und Baltas 2000, S. 3; Niaz und Rodríguez 2002, S. 62; Weitze und Liebert 2006, S. 13), darf ihre Bedeutung für den Aufbau eines adäquaten *Nature-of-Science*-Verständnisses nicht unterschätzt werden. Darum sollte unter der Perspektive von *Nature of Science* aufgezeigt werden, wie wissenschaftliche Kontroversen als „Motor des Erkenntnisfortschritts" (Nehrdich 2011, S. 18) dienen, dass Kontroversen „konstitutiv für Wissenschaft" (Liebert 2006, S. 129) sind bzw. dass Kontroversität und Wissenschaft, wie Dillon, Grace und Oulton (2004, S. 4) es ausdrücken, „Hand in Hand gehen". Aufgrund dessen können Kontroversen im Physikunterricht genutzt werden, um *Nature-of-Science*-Aspekte zu entdecken und geeignete Vorstellungen zum Wesen der Wissenschaft zu etablieren (vgl. Albe 2008, S. 806; Dascal 2006, S. 36; Kipnis 2001, S. 33). Der konkrete Beitrag im Bereich von *Nature of Science* ist durchaus breitgefächert (siehe auch Kapitel 2.3.1, ab S. 45). So wird in der Literatur auf reichhaltige Lerngelegenheiten hingewiesen: Schüler könnten anhand kontroverser Inhalte beispielsweise lernen, ...

... dass die Entstehung und Weiterentwicklung wissenschaftlicher Ideen ein komplexer Prozess ist und Fortschritt in der Wissenschaft nicht allein durch neue empirische Daten entsteht (vgl. Garritz 2013, S. 1787).

... dass Wissenschaftler sich genauso wie andere Menschen verhalten und bei der Entscheidung über Forschungsfelder und Untersuchungsmethoden subjektive Einstellungen und Standpunkte eine Rolle spielen (vgl. Dillon, Grace und Oulton 2004, S. 4).

... dass auch soziale Prozesse Bestandteil von Wissenschaft sind (vgl. Scott, Richards und Martin 1990, S. 474).

... dass in der Wissenschaft unterschiedliche Deutungen desselben Phänomens möglich sind und wie Wissenschaftler mit Unsicherheit bei der Erkenntnisgenese umgehen müssen (vgl. Albe 2008, S. 806).

... wie Wissenschaftler ihre Ideen und Theorien gegenüber der Kritik anderer behaupten (vgl. Kipnis 2001, S. 48).

... welche Bedeutung Kritik sowie Ideenreichtum für wissenschaftliches Arbeiten haben (vgl. Dearden 1981, S. 41).

... dass Wissenschaft weder ein „monolithic block of certain knowledge" ist, noch einer streng linearem und ganz selbstverständlichen Entwicklung folgt (ebd.).

Umso problematischer ist es, wenn Kontroversität zu selten bei der Vermittlung naturwissenschaftlicher Inhalte berücksichtigt wird (vgl. z. B. Nehrdich 2011, S. 15; Schindler, Lehnen und Jakobs 2006, S. 82). Wissenschaftliche Erkenntnisse werden oft als fertige Ergebnisse präsentiert, die frei von Diskussion und Konflikten sind (vgl. Machamer, Pera und Baltas 2000, S. 3; Weitze und Liebert 2006, S. 13). Kontroversen werden als „Randphänomene innerhalb der Wissenschaft" (Dascal 2006, S. 23) im Vergleich zu einer sonst „geradlinige[n] Erfolgsgeschichte" (Weitze und Liebert 2006, S. 8) betrachtet. Girwidz und Müller (2016, S. 6) beschreiben, wie Schüler „Naturwissenschaft häufig als starres Gebilde, das auf Gesetzen beruht, an denen kaum zu rütteln ist" wahrnehmen, was im Widerspruch zur Realität der wissenschaftlichen Praxis steht. Unter diesen Umständen werden häufig allerdings auch fundamentale Prinzipien wissenschaftlicher Denk- und Arbeitsweisen, wie die spezifischen Bewertungskriterien sowie Fachstandards und -methoden einer Disziplin nicht ausreichend dargestellt (vgl. Dearden 1981, S. 41). Das Ausblenden diskursiver Verhandlungsprozesse unter Wissenschaftlern verklärt das Bild der Naturwissenschaften:

> Dabei führt die Beschränkung der Vermittlung auf Faktenwissen, Ergebnisse und Theorien jedoch dazu, dass Missverständnisse über wissenschaftliche Methoden transportiert werden, und dass die Gültigkeit wissenschaftlicher Ergebnisse für Außenstehende uneinschätzbar ist. Wissen über Wissenschaft ist aber gerade relevant, um Unsicherheiten der Wissensproduktion und die Gültigkeit des wissenschaftlichen Wissens einschätzen zu können. (Weitze und Liebert 2006, S. 8)

Insofern sollte die Kontroversität naturwissenschaftlicher Wissensproduktion ein obligatorischer Bestandteil des Physikunterrichts sein, um adäquate *Nature-of-Science*-Vorstellungen der Lernenden zu entwickeln.

Aus der entscheidenden Bedeutung von Kontroversität in den Wissenschaften leiten Schindler, Lehnen und Jakobs (2006, S. 82) eine didaktische Verantwortung ab, „sowohl die Darstellung wissenschaftlicher Kontroversen als auch ihre Einübung als diskursive Praxis zentral für die *Vermittlung*, *Aneignung* und *Anwendung* [Hervorhebung im Original] wissenschaftlichen Wissens" anzusehen. Die Autoren sprechen hierbei sogar von der „Fähigkeit zu kontroversem Denken" bzw. einer sogenannten „Kontroversefähigkeit" (ebd., S. 82 f.). Diese umfasse Kompetenzen im Zusammenhang mit dem Erkennen, Nachvollziehen und Wiedergeben von Kontroversen, aber auch die Aneignung und Integration „von disziplinenspezifischen Denk- und

Diskursmustern“ (ebd., S. 87) in die eigene Herangehens- und Arbeitsweise. Auch Oulton, Dillon und Grace (2004) gehen davon aus, dass Schüler auf den Umgang mit Kontroversen und deren spezielles Wesen vorbereitet werden müssen. Dazu zählen ein klares Verständnis von Wissenschaft (z. B. vorläufiger Charakter naturwissenschaftlichen Wissens), kritisches Denken und die Reflexion von Argumenten oder anderen Meinungen, eigener Antrieb und geeignete Fähigkeiten, um mehr Informationen zu einem Sachverhalt zusammenzutragen und Argumentationsfähigkeit (vgl. ebd., S. 419 f.). Andere Autoren sprechen allgemeiner von Möglichkeiten anhand kontroverser Fragestellungen das selbstständige Denken der Lernenden weiterzuentwickeln (vgl. Hedtke 2002, S. 174; Van Rooy 1993, S. 317). Stradling (1984, S. 123) ist davon überzeugt, dass Schüler durch Kontroversität „academic and study skills (for instance, constructing hypotheses, collecting and evaluating evidence, analysing statistics, presenting findings)“ erwerben können.

2.2.2 Verortung innerhalb der Kompetenzbereiche des Physikunterrichts

In diesem Abschnitt werden die Elemente des Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen hinsichtlich der vier Kompetenzbereiche des Physikunterricht beschrieben. Tabelle 2.1 (S. 43) fasst die wichtigsten Komponenten dieses Bildungswertes für die Kompetenzbereiche der nationalen Bildungsstandards übersichtlich zusammen, wobei die im Zusammenhang mit wissenschaftlichen Kontroversen besonders markanten bzw. relevanten Kompetenzen fettgedruckt hervorgehoben wurden.

Kompetenzbereich Fachwissen bzw. Sachkompetenz

Um wissenschaftliche Kontroversen und die damit verbundenen fachlichen Fragestellungen nachvollziehen zu können, müssen je nach Thematik entsprechende Fachinhalte vorausgesetzt werden, die entweder bereits im Unterricht vermittelt wurden und nun angewendet werden können oder neu erarbeitet werden müssen. Da sich wissenschaftliche Kontroversen auf konkrete fachwissenschaftliche Inhalte beziehen, bildet das jeweils notwendige Fachwissen der Schüler die Grundlage für das Verständnis der fachlichen Aspekte einer wissenschaftlichen Kontroverse. Dementsprechende Voraussetzungen für die Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Kontroversen werden in den Kompetenzen F1, F2 sowie S1 und S2 der Bildungsstandards abgebildet, wie in Tabelle 2.1 (S. 43) dargestellt. Fachwissen in Bezug auf physikalische Größen, Begriffe, Gesetze, Messverfahren, Modelle und Theorien (siehe F1, F2 und S1) wird von den Schülern benötigt, um beispielsweise unterschiedliche Erklärungsansätze zur Beschreibung physikalischer Phänomene, wie sie in einer wissenschaftlichen Kontroverse dargeboten werden, begreifen zu können. Da kontroverse Fachinhalte meist tiefliegende Voraussetzungen oder Annahmen (siehe Kapitel 2.1 Merkmal (6)) betreffen, können dabei im Unterricht ausgewählte Sachverhalte vor allem vertieft, ausgeschärft oder erweitert werden. Im Sinne exemplarischen Lernens können wissenschaftliche Kontroversen als besondere Beispiele oder Fälle für die Anwendung bestimmter Theorien, Modelle, Konzepte oder physikalischer Erklärungen behandelt werden (vgl. Stradling 1984, S. 123), um Sachkompetenzen zu vermitteln.

Insbesondere können kontroverse Fachthemen genutzt werden, um Möglichkeiten und Grenzen physikalischer Erkenntnisse zu erfassen. Hierbei bestehen mögliche Bezugspunkte zur Thematisierung von Gültigkeitsbereichen oder allgemein der Erklärungskraft physikalischer Theorien und Modelle, wie sie die Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife in der Sachkompetenz S2 und auch die Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss im Bereich Fachwissen (vgl. KMK 2005, S. 8) vorsehen. Gerade wissenschaftliche Kontroversen erscheinen hierzu speziell geeignet, so dass ausdrücklich die Sachkompetenz S2 im Vordergrund bei der Auseinandersetzung mit solchen Problemstellungen stehen kann.

Bemerkenswert für den Einbezug wissenschaftlicher Kontroversen im Physikunterricht ist die einzigartige Gelegenheit, ein Thema aus verschiedenen Perspektiven heraus zu analysieren, um das Verständnis eines Sachverhalts zu erleichtern (vgl. Kipnis 2001, S. 33) oder um eine vertiefte Einsicht zu gewinnen.

Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung

Im Bereich Erkenntnisgewinnung bietet die Integration wissenschaftlicher Kontroversen im Physikunterricht hohes Potenzial. Auf der einen Seite spielen in der Erschließung wissenschaftlicher Kontroversen für die Lernenden Kompetenzen eine Rolle, die sie zu Erkenntnissen über die Kontroverse an sich gelangen lassen. Da die Informationsrecherche in unterschiedlichen Quellen unabdingbar für einen multiperspektivischen Zugang zu kontroversen Fachinhalten ist, können entsprechend der Kompetenz E2 der Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss (siehe Tabelle 2.1, S. 43) wichtige Kenntnisse und Fähigkeiten erworben werden. Bei der kritischen Auseinandersetzung mit unterschiedlichen Fachpositionen sind die Kompetenzen E10 (Mittlerer Schulabschluss) und E3 (Allgemeine Hochschulreife) entscheidend, um die Bedeutung experimenteller Ergebnisse und Beobachtungen für die Klärung der Problemfrage abschätzen zu können. Die in Erfahrung gebrachten Informationen und Daten müssen von den Schülern eingeordnet werden, indem sie versuchen, bekannte Modelle oder Theorien zu deren Erklärung anzuwenden (E6, Allgemeine Hochschulreife). Aber auch die in kontroverse Fachpositionen eingehenden Modelle und Theorien selbst müssen hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit im jeweiligen Kontext oder Zusammenhang beurteilt werden (E8, Allgemeine Hochschulreife).

Auch die Vermittlung eines angemessenen Bildes zur *Nature of Science* wird in den Standards im Bereich der Erkenntnisgewinnungskompetenz festgehalten:

> Die *Erkenntnisgewinnungskompetenz* [Hervorhebung im Original] der Lernenden zeigt sich in der Kenntnis von naturwissenschaftlichen Denk- und Arbeitsweisen und in der Fähigkeit, diese zu beschreiben, zu erklären und zu verknüpfen, um Erkenntnisgewinnungsprozesse nachvollziehen oder gestalten zu können und deren Möglichkeiten und Grenzen zu reflektieren. (KMK 2020, S. 9)

Die Vermittlung von Vorstellungen in Bezug auf *Nature of Science* wird auch von Höttecke und Hopf (2018, vgl. S. 272) im Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung angesiedelt. Konkret werden diese Aspekte beispielsweise explizit in den Kompetenzen E9 und E11 (siehe Tabelle 2.1, S. 43) der Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife ausgedrückt. Wie bereits in diesem Kapitel beschrieben, liefern wissenschaftliche Kontroversen verschiedene Lerngelegenheiten im Bereich von *Nature of Science*, so dass auch diese Kompetenzaspekte abgebildet werden können.

Kompetenzbereich Kommunikation

In Übereinstimmung mit den Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss (siehe Tabelle 2.1, S. 43) können zur Umsetzung des Kontroversitätsprinzips im Physikunterricht verschiedene Informationsquellen zur Erschließung von Inhalten genutzt (K3) und Fachinhalte in der Lerngruppe diskutiert werden (K7). Im Rahmen solcher Diskussionsprozesse können sich Schüler „über physikalische Erkenntnisse und deren Anwendungen unter angemessener Verwendung der Fachsprache und fachtypischer Darstellungen" (KMK 2005, S. 12) verständigen (K1).

Auch an die Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife kann unter den Gesichtspunkten des Einbezugs verschiedener Informationsquellen sowie der Wiedergabe und Diskussion von Fachinhalten angeknüpft werden. Die dort ausgewiesenen Kompetenzen K1 und K3 (siehe Tabelle 2.1, S. 43) zur Informationserschließung sind in der Beschäftigung mit wissenschaftlichen Kontroversen im Physikunterricht nicht zu vernachlässigen. Bei der anschließenden Weiterverarbeitung von Informationen zu den unterschiedlichen Fachmeinungen einer kontroversen Problemstellung sollte auch die kritische Prüfung der Quellen (K2) gewichtig sein (vgl. Stradling 1984, S. 122 f.). Als Voraussetzung innerfachlicher Diskussionen können die Kompetenzen K4 und K5 angesehen werden. Angesichts der oft hohen Komplexität wissenschaftlicher Kontroversen hält es Levinson (2006, vgl. S. 1220) für wichtig, Hauptargumente identifizieren zu können bzw. die zentralen Punkte der Problematik zu erfassen (siehe K5). Dies schließt passend zur Kompetenz K8 (Allgemeine Hochschulreife) ein, dass Argumentationsstrukturen erkannt und hinsichtlich ihrer Gültigkeit bewertet werden. Für eigene Diskussionen können zusätzlich selbst Argumentationen ausgearbeitet werden. Diese können im Austausch mit anderen Schülern debattiert werden (K9, Allgemeine Hochschulreife), wodurch sich insgesamt wissenschaftlich fundiertes (siehe auch K10) Argumentieren und Diskursfähigkeit trainieren lässt.

Weil Kommunikationskompetenz auf die „Kenntnis von Fachsprache, fachtypischen Darstellungen und Argumentationsstrukturen" sowie „die Fähigkeit, diese zu nutzen, um fachbezogene Informationen zu erschließen, adressaten- und situationsgerecht darzustellen und auszutauschen" abzielt (KMK 2020, S. 9), stellt sie einen primären fachdidaktischer Fokus für den schulischen Umgang mit wissenschaftlichen Kontroversen dar. Die innerfachlichen Problemstellungen dieser Kontroversen bieten der Entwicklung von Kommunikationskompetenz in vielerlei Hinsicht Raum und könnten Schüler zu physikbezogenen Diskussionen motivieren.

Kompetenzbereich Bewertung

Wissenschaftliche Kontroversen, wie sie in dieser Arbeit charakterisiert wurden (siehe Kapitel 2.1.2, ab S. 24), beziehen sich auf gegensätzliche Fachmeinungen *innerhalb* einer Wissenschaftsdisziplin, ohne domänenübergreifende Standpunkte beispielsweise aus Ökonomie, Ökologie, Politik, Ethik oder Medizin zu berühren. Da Bewertungskompetenz laut Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife aber ausschließlich überfachliche Problemstellungen betrifft, wird ein entsprechender Kompetenzerwerb in diesem Bereich für innerfachliche Fragestellungen, wie sie in wissenschaftlichen Kontroversen auftauchen, nahezu ausgeschlossen:

> Physikalisch kompetent bewerten heißt also, über die rein sachliche Beurteilung von physikalischen Aussagen hinauszugehen, weshalb rein innerfachliche Bewertungen z. B. der Anwendbarkeit eines Modells, der Güte von Experimentierergebnissen oder der Korrektheit fachwissenschaftlicher Argumentationen den anderen drei Kompetenzbereichen zugeordnet sind. (KMK 2020, S. 17)

Auch die Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss liefern nur einen marginalen Anhaltspunkt (B1) für die Förderung von Bewertungskompetenz im Zusammenhang mit wissenschaftlichen Kontroversen. Da in diesen aber häufig auch Grenzen physikalischer Modelle, Theorien oder experimenteller Forschungsmethoden zutage treten, könnte die Kompetenz B1 ein Ziel in Verbindung mit kontroversen fachwissenschaftlichen Inhalten im Physikunterricht sein.

Ein Beitrag zur Bewertungskompetenz könnte durch die Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Kontroversen jedoch indirekt erfolgen. Unter „Sachverhalte und Informationen multiperspektivisch beurteilen“ werden in den Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife (KMK 2020, S. 16) die folgenden beiden Kompetenzen genannt:

B1 erläutern aus verschiedenen Perspektiven Eigenschaften einer schlüssigen und überzeugenden Argumentation;

B2 beurteilen Informationen und deren Darstellung aus Quellen unterschiedlicher Art hinsichtlich Vertrauenswürdigkeit und Relevanz

Zwar können diese Kompetenzen durch die Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Kontroversen nicht für eine fachübergreifende Sichtweise ausgebildet, aber im innerfachlichen Kontext prinzipiell angebahnt werden, um auf überfachliche Probleme übertragen werden zu können. Auch innerfachliche Kontroversität kann bezüglich fachlicher Perspektiven vielfältig sein und so Multiperspektivität ermöglichen. Ein weiterer Punkt, in dem Bewertungskompetenz sekundär von der Problematisierung fachwissenschaftlicher Kontroversen im Unterricht profitieren könnte, betrifft das Bewertungsstrukturwissen. Höttecke (2013, S. 9) hebt hervor, dass „Wissen über das Wie des Urteilens und Entscheidens“, also Kenntnisse über mögliche Verfahren zur Entscheidungsfindung grundlegend seien. Kenntnisse zu Bewertungsverfahren, wie sie von den Bildungsstandards angestrebt werden (KMK 2020, S. 9), sind auch in komplexeren fachlichen Urteilssituationen anwendbar. Somit könnten diesbezüglich Synergieeffekte zwischen inner- und überfachlichem Bewerten genutzt werden. Da Bewertungskompetenz durch die neueren Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife aber im Wesentlichen nicht die Auseinandersetzung mit innerfachlichen Fragen (sondern vielmehr mit Socio-Scientific Issues) intendiert, soll der Kompetenzbereich Bewertung bei der Betrachtung des Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen im Physikunterricht weitestgehend ausgeklammert bleiben. „Innerfachliche Bewertungskompetenzen“ können für den Bildungswert wissenschaftlicher Kontroversen im Physikunterricht hauptsächlich in den Bereichen Erkenntnisgewinnungskompetenz (z. B. E3 und E8, Allgemeine Hochschulreife) und Kommunikationskompetenz (z. B. K2 und K8, Allgemeine Hochschulreife) vorgefunden werden. Diese beiden Kompetenzbereiche bestimmen auch die wesentlichen Schwerpunkte des Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen für den Physikunterricht und finden deshalb im Folgenden besondere Beachtung.

Tabelle 2.1: Kompetenzen der Bildungsstandards im Zusammenhang mit wissenschaftlichen Kontroversen

	Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss	**Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife**
Fachwissen/Sachkompetenz	F1 verfügen über ein strukturiertes Basiswissen auf der Grundlage der Basiskonzepte F2 geben ihre Kenntnisse über physikalische Grundprinzipien, Größenordnungen, Messvorschriften, Naturkonstanten sowie einfache physikalische Gesetze wieder	S1 erklären Phänomene unter Nutzung bekannter physikalischer Modelle und Theorien **S2 erläutern Gültigkeitsbereiche von Modellen und Theorien und beschreiben deren Aussage- und Vorhersagemöglichkeiten**
Erkenntnisgewinnung	**E2 wählen Daten und Informationen aus verschiedenen Quellen zur Bearbeitung von Aufgaben und Problemen aus, prüfen sie auf Relevanz und ordnen sie** E10 beurteilen die Gültigkeit empirischer Ergebnisse und deren Verallgemeinerung	E1 identifizieren und entwickeln Fragestellungen zu physikalischen Sachverhalten E3 beurteilen die Eignung von Untersuchungsverfahren zur Prüfung bestimmter Hypothesen E6 erklären mithilfe bekannter Modelle und Theorien die in erhobenen oder recherchierten Daten gefundenen Strukturen und Beziehungen **E8 beurteilen die Eignung physikalischer Modelle und Theorien für die Lösung von Problemen** **E9 reflektieren die Relevanz von Modellen, Theorien, Hypothesen und Experimenten für die physikalische Erkenntnisgewinnung** **E11 reflektieren Möglichkeiten und Grenzen des konkreten Erkenntnisgewinnungsprozesses sowie der gewonnenen Erkenntnisse (z. B. Reproduzierbarkeit, Falsifizierbarkeit, Intersubjektivität, logische Konsistenz, Vorläufigkeit)**

Tabelle 2.1: Kompetenzen der Bildungsstandards im Zusammenhang mit wissenschaftlichen Kontroversen (Fortsetzung)

Kommunikation	K1 tauschen sich über physikalische Erkenntnisse und deren Anwendungen unter angemessener Verwendung der Fachsprache und fachtypischer Darstellungen aus **K3 recherchieren in unterschiedlichen Quellen** **K7 diskutieren Arbeitsergebnisse und Sachverhalte unter physikalischen Gesichtspunkten**	K1 recherchieren zu physikalischen Sachverhalten zielgerichtet in analogen und digitalen Medien und wählen für ihre Zwecke passende Quellen aus **K2 prüfen verwendete Quellen hinsichtlich der Kriterien Korrektheit, Fachsprache und Relevanz für den untersuchten Sachverhalt** K3 entnehmen unter Berücksichtigung ihres Vorwissens aus Beobachtungen, Darstellungen und Texten relevante Informationen und geben diese in passender Struktur und angemessener Fachsprache wieder K4 formulieren unter Verwendung der Fachsprache chronologisch und kausal korrekt strukturiert **K5 wählen ziel-, sach- und adressatengerecht geeignete Schwerpunkte für die Inhalte von Präsentationen, Diskussionen oder anderen Kommunikationsformen aus** **K8 nutzen ihr Wissen über aus physikalischer Sicht gültige Argumentationsketten zur Beurteilung vorgegebener und zur Entwicklung eigener innerfachlicher Argumentationen** **K9 tauschen sich mit anderen konstruktiv über physikalische Sachverhalte aus, vertreten, reflektieren und korrigieren gegebenenfalls den eigenen Standpunkt** K10 prüfen die Urheberschaft, belegen verwendete Quellen und kennzeichnen Zitate
Bewertung	B1 zeigen an einfachen Beispielen die Chancen und Grenzen physikalischer Sichtweisen bei inner- und außerfachlichen Kontexten auf	Innerfachliche Bewertungen werden den anderen drei Kompetenzbereichen zugeordnet.

(KMK 2005, S.11 f. und KMK 2020, S. 13-17)

2.3 Wissenschaftliche Kontroversen und *Nature of Science*

2.3.1 Aspekte von *Nature of Science* im Zusammenhang mit wissenschaftlichen Kontroversen

Wie in Kapitel 2.2 (ab S. 34) erläutert, ergibt sich schwerpunktmäßig im Bereich von *Nature of Science* ein besonderer Bildungswert wissenschaftlicher Kontroversen für den Physikunterricht. Deshalb soll im vorliegenden Kapitel zusammengefasst werden, welche konkreten Elemente wissenschaftlicher Kontroversen mit *Nature-of-Science*-Aspekten in Zusammenhang stehen. Hierzu werden in der fachdidaktischen Forschung etablierte Beschreibungen von *Nature of Science* durch Lederman et al. (2002), McComas und Olson (1998), Osborne et al. (2003) und Allchin (2011) herangezogen.

Unter dem Begriff *Nature of Science* werden in den Fachdidaktiken für die naturwissenschaftlichen Fächer epistemologische, wissenschaftstheoretische Vorstellungen bzw. Wesenszüge zu Erkenntnisgewinnungsprozessen und deren sozialen Kontexten sowie zu den Eigenschaften des Wissens in den Naturwissenschaften subsumiert (vgl. Heering und Kremer 2018, S. 105). Für die Konzeptualisierung dieser „Natur der Naturwissenschaften" existieren sehr unterschiedliche Ansätze, zu denen Schulze Heuling, Mikelskis-Seifert und Nückles (2019, S. 155) feststellen, dass „eine Festlegung auf ein allgemeingültiges Standardmodell ein kompliziertes Unterfangen ist". So verfolgten beispielsweise Lederman et al. (2002) für die Erstellung eines geeigneten Messinstruments (*VNOS*) zur Untersuchung von *Nature-of-Science*-Vorstellungen das Ziel, eine Liste verschiedener Aspekte zur Klärung der Bedeutung von *Nature of Science* aufzustellen, die später auch als „consensus approach" (Abd-El-Khalick 2012) bezeichnet wurden. Ebenso gelangen McComas und Olson (1998) im Rahmen einer Analyse verschiedener Bildungsdokumente und Osborne et al. (2003) vermittels einer Delphi-Studie zu solchen Aspektlisten. Konträr dazu formuliert Allchin (2011) seinen *Nature-of-Whole-Science*-Ansatz, in dem er einen zweckorientierten (funktionalen) Zugang mit einem besonderen Fokus auf der Beurteilung der Zuverlässigkeit wissenschaftlicher Erkenntnisse wählt. Allchin (2011, vgl. S. 523 f.) kritisiert, dass die Aspektlisten nicht die Ziele von *Scientific Literacy* im Hinblick auf die Urteils- und Entscheidungskompetenz der Lernenden erfüllen können. Wiederum ein anderes sehr strukturell gedachtes Konzept von *Nature of Science* wird von Erduran und Dagher (2014) vorgeschlagen. In ihrem *Family Resemblance Approach* (*FRA*) versuchen die Autoren neben der Schnittmenge aller Naturwissenschaften auch die Unterschiedlichkeit einzelner Disziplinen einzubeziehen. Ein Überblick zu diesen mitunter gegensätzlichen Ansätzen findet sich beispielsweise bei Heering und Kremer (2018), Schulze Heuling, Mikelskis-Seifert und Nückles (2019) oder in Kurzform auch bei Dagher und Erduran (2016).

Um diese Vielfalt fachdidaktischer Zugänge nicht zu vernachlässigen, wird die Stellung wissenschaftlicher Kontroversen bzw. Kontroversität in den Naturwissenschaften im Gefüge von *Nature of Science* sowohl anhand verschiedener Aspektlisten als auch im Sinne des *Nature-of-Whole-Science*-Ansatzes betrachtet. Die Orientierung an Aspektlisten lässt die Anknüpfung an eine jahrzentelange *Nature-of-Science*-Forschungstradition zu und ist aufgrund deren breiter Anwendung in naturwissenschaftsdidaktischen Arbeiten unbedingt zu berücksichtigen. Lohnenswert ist ebenfalls ein Bezug zum *Nature-of-Whole-Science*-Ansatz, da Allchin (2011) sein

Konzept stringent entlang einer *Scientific Literacy* der Lernenden ausrichtet, was passend zum grundsätzlichen Bildungswert wissenschaftlicher Kontroversen (siehe Kapitel 2.2.1, ab S. 34) erscheint. Die Stärke des *Family Resemblance Approach* liegt vor allem in der Zusammenführung und Abbildung disziplinspezifischer Charakteristika von *Nature of Science*. Dieser Gesichtspunkt dürfte jedoch für das Ziel des Kapitels nicht wesentlich sein, da sich in der vorliegenden Arbeit mit der Perspektive auf wissenschaftliche Kontroversen in der Physik auf eine spezielle Naturwissenschaft festgelegt wurde. Somit ist ein Mehrwert durch Einbezug des *Family Resemblance Approach* an dieser Stelle nicht zu erwarten.

Nature-of-Science-Aspekte nach Lederman et al. (2002)

Für die Entwicklung eines standardisierten Instruments - dem *Views of Nature of Science Questionnaire* (*VNOS*) - legen sich Lederman et al. (2002) auf die folgenden *Nature-of-Science*-Aspekte fest, von denen sie annehmen, dass diese für schulische Zwecke konsensfähig unter philosophischen, soziologischen, historischen und didaktischer Perspektiven sind:

- The Empirical Nature of Scientific Knowledge (Observation, Inference, and Theoretical Entities in Science)
- Scientific Theories and Laws
- The Creative and Imaginative Nature of Scientific Knowledge
- The Theory-Laden Nature of Scientific Knowledge
- The Social and Cultural Embeddedness of Scientific Knowledge
- Myth of The Scientific Method
- The Tentative Nature of Scientific Knowledge

Einige dieser Aspekte weisen Verbindungen mit wissenschaftlichen Kontroversen auf, die im Folgenden kurz skizziert werden.

The Empirical Nature of Scientific Knowledge: Lederman et al. (2002, vgl. S. 499 f.) beschreiben, inwiefern wissenschaftliche Erkenntnisse auf Beobachtungen beruhen. Dabei seien diese Beobachtungen stets abhängig von der Wahrnehmung und Interpretation der Wissenschaftler, nie aber frei von theoretischen Vorannahmen, so dass zwischen Beobachtung und Schlussfolgerung unterschieden werden müsse. Diese Unterscheidung spielt auch bei wissenschaftlichen Kontroversen eine Rolle. Die unterschiedlichen Standpunkte von Wissenschaftlern in einer solchen Kontroverse gehen oftmals zurück auf einen Dissens in Bezug auf theoretische Grundannahmen (siehe Kapitel 2.1.2, S. 29, Merkmal (6)) oder verschiedene Interpretationen empirischer Daten (siehe Kapitel 2.1.2, S. 28, Merkmal (5)). Eine Unterscheidung zwischen Beobachtung bzw. wissenschaftlichen Daten an sich und deren Interpretation (Schlussfolgerungen aus den Daten ziehen) ist auch hilfreich, damit Lernende Ursachen für die Kontroversität in wissenschaftlichen Fragen besser verstehen. Das könnte auch ein Beitrag zur Vermeidung eines „Wissenschaftsrelativismus“ sein, bei dem der Wahrheitswert wissenschaftlicher Aussagen aufgrund der verschiedenen kontroversen Positionen unter Wissenschaftlern als beliebig

angesehen wird. Die empirische Fundierung und evidenzbasierte Ableitung wissenschaftlicher Erkenntnisse in den Naturwissenschaften ist besonders bei der Diskussion dieser Erkenntnisse unter Wissenschaftlern unverzichtbar. Deshalb wird dieser *Nature-of-Science*-Aspekt gerade in der Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Kontroversen offensichtlich und kann reflexiv thematisiert werden, zumal ein Mangel an Evidenz eine Kontroverse auch bedingen kann (vgl. Dearden 1981, S. 38).

The Theory-Laden Nature of Scientific Knowledge: Wissenschaftliche Erkenntnisse sind ausnahmslos theoriegeladen, das heißt abhängig von theoretischen Vorannahmen, bereits vorhandenem Wissen, bestimmten Arbeitshypothesen, aber auch Erfahrungswerten und Erwartungen (vgl. Lederman et al. 2002, S. 501). Derlei Prämissen oder Annahmen, von denen Wissenschaftler ausgehen, können im Kern einer wissenschaftlichen Kontroverse liegen (siehe Kapitel 2.1.2, S. 29, Merkmal (6)), weil sie beispielsweise zu unterschiedlichen Interpretationen von Beobachtungen (vgl. ebd.) und damit schließlich zur Unauflösbarkeit konfligierender Ansichten führen können (siehe Kapitel 2.1.2, S. 28, Merkmal (5)).

The Social and Cultural Embeddedness of Scientific Knowledge: Wissenschaft ist „a human enterprise“ (ebd.) und als solche abhängig von sozialen Interaktionen und Verhältnissen. Wenn Wissenschaftler in wissenschaftlichen Kontroversen einen Diskurs führen, muss dieser auch als sozialer Aushandlungsprozess verstanden werden, da Faktoren des sozialen Miteinanders Einfluss auf diese Prozesse nehmen. Weil auch Wissenschaft keine rein objektiven Wahrheiten behandelt, ist die Verhandlung von Erkenntnissen unter Wissenschaftlern auch als sozialer Vorgang zu verstehen, in dem subjektive Meinungen und Beziehungen untereinander von Bedeutung sind. In einer Diskussion gemeinsam einen Konsens zu erarbeiten (bzw. dies zu versuchen), ist ein soziales Geschehen und verlangt soziale Kompetenzen. Diesbezüglich ist auch Höttecke (2010, S. 63) der Auffassung, dass

> [...] die Geltung von Wissen häufig in Konkurrenzsituationen ausgehandelt [wird]. Wissenschaftliche Kontroversen weisen auf den sozialen Charakter der Naturwissenschaften hin und zeigen Wissen als vorläufig, konsensual und fragil.

Myth of The Scientific Method: Diskussionspunkt in wissenschaftlichen Kontroversen können auch die verwendeten Forschungsmethoden sein (siehe Kapitel 2.1.2, S. 29, Merkmal (6)) von denen unterschiedliche Wissenschaftler in ihren Argumentationen und Untersuchungen ausgehen. Insofern können wissenschaftliche Kontroversen geeignet sein, die Vielfalt an Methoden und Vorgehensweisen in der Wissenschaft zu illustrieren. Damit bestünde die Gelegenheit, der Vorstellung entgegenzuwirken, dass in der Wissenschaft eine einfache, stringente Abfolge von Erkenntnisschritten im Sinne einer bestimmten unabänderlichen Methode existiere, die wie ein Rezept nur abgearbeitet werden müsse, um Forschungsfragen vollständig beantworten zu können (vgl. Lederman et al. 2002, S. 501 f.).

The Tentative Nature of Scientific Knowledge: In wissenschaftlichen Kontroversen spiegelt sich die Vorläufigkeit wissenschaftlichen Wissens unmittelbar wider. Das Vorhandensein unterschiedlicher, miteinander unvereinbarer wissenschaftlicher Positionen (siehe Kapitel 2.1.2, S. 24, Merkmal (1)) verdeutlicht, dass die Erkenntnisse der Wissenschaften nicht unumstößlich sicher (vgl. ebd., S. 502), zweifelsfrei oder eindeutig sind. Vielmehr zeigt sich in wissenschaftlichen Kontroversen häufig, wie ein bis dato akzeptierter Konsens in Frage gestellt wird

(siehe Kapitel 2.1.2, S. 30, Merkmal (7)) oder wie Ergebnisse von Fachkollegen kritisch begutachtet, angezweifelt und geprüft werden (siehe Kapitel 2.1.2, S. 26, Merkmal (2)), so dass diese gegebenenfalls überarbeitet oder gar verworfen werden müssen. Wenn wissenschaftliche Kontroversen entstehen und schließlich zum Beispiel durch neu gewonnene Informationen beigelegt werden können, zeigt sich, dass wissenschaftliche Erkenntnisse Veränderungen unterliegen (vgl. ebd.), dass zuvor anerkannte Theorien oder Modelle revidiert werden müssen bzw. allgemein wissenschaftliche Aussagen korrigiert werden können. Darum scheint der Zusammenhang zwischen wissenschaftlichen Kontroversen und der Vorläufigkeit bzw. Entwicklung wissenschaftlichen Wissens insgesamt besonders stark zu sein.

Nature-of-Science-Aspekte nach McComas und Olson (1998)

McComas und Olson (1998) haben acht verschiedene Dokumente aus unterschiedlichen Ländern zu den Standards für die Bildung im naturwissenschaftlichen Bereich qualitativ ausgewertet und nach gemeinsamen *Nature-of-Science*-Inhalten gesucht. Die Autoren sehen dabei weitestgehend Übereinstimmung zwischen den Dokumenten und ordnen die von ihnen herausgearbeiteten *Nature-of-Science*-Aspekte als Konsens dieser Standards ein (vgl. ebd., S. 48). Aus der von McComas und Olson erstellten Liste mit *Nature-of-Science*-Aspekten sollen an dieser Stelle nur im Zusammenhang mit wissenschaftlichen Kontroversen relevante Aspekte betrachtet werden. Die folgenden Aspekte lassen sich prinzipiell einigen der oben dargestellten Ausführungen zu den *Nature-of-Science*-Elementen von Lederman et al. (2002) zuordnen und werden dementsprechend nicht noch einmal genauer erläutert:

The Empirical Nature of Scientific Knowledge:

- Science relies on empirical evidence (McComas und Olson 1998, S. 43)
- Science aims to be testable (ebd.)
- Scientific knowledge is based on observation (ebd., S. 44)
- Scientific knowledge is based on experimental evidence (ebd.)

The Theory-Laden Nature of Scientific Knowledge:

- Observations are theory-laden (ebd., S. 45)

The Social and Cultural Embeddedness of Scientific Knowledge:

- Scientific ideas are affected by their social & historical milieu (ebd., S. 47)

The Tentative Nature of Scientific Knowledge:

- Scientific knowledge is tentative (ebd., S. 43)
- Science will never be finished (ebd.)
- Change in science results from information of better theories (ebd., S. 44)

- Change in science occurs gradually (ebd., S. 46)
- Change in science occurs through revolutions (ebd.)

Zusätzlich geben McComas und Olson noch weitere *Nature-of-Science*-Aspekte an, die in Verbindung mit wissenschaftlichen Kontroversen gebracht werden können:

Science relies on skepticism (ebd., S. 43): In einer wissenschaftlichen Kontroverse argumentieren Wissenschaftler für verschiedene Positionen. In diesem diskursiven Austausch werden Aussagen gegenseitig hinterfragt und deren Fundierung eruiert. Voraussetzung dafür ist nicht zuletzt ein allgemeiner Skeptizismus als Haltung des Wissenschaftlers, mit dem Ziel, die Gültigkeit von Argumenten und wissenschaftlichen Aussagen kritisch zu beurteilen. Auch Dascal (2006, vgl. S. 22) betrachtet Kritik als essentielles Element wissenschaftlicher Praxis. Wissenschaftliche Skepsis gehört geradezu zum „Kodex“ wissenschaftlichen Arbeitens und zeigt sich bei wissenschaftlichen Kontroversen in Form von wechselseitiger Kritik und dem Infragestellen der unterschiedlichen Standpunkte.

Science aims to be consistent (McComas und Olson 1998, S. 43): Diese Zielstellung von Wissenschaft, das Streben nach innerer Konsistenz, ist im Prinzip die Grundlage einer wissenschaftlichen Kontroverse. Aus dem Bemühen um Widerspruchsfreiheit bei gleichzeitigem Bestehen von miteinander unvereinbaren Positionen erwächst die Relevanz der wissenschaftlichen Kontroverse (siehe Kapitel 2.1.2, S. 27, Merkmal (4)), denn der Konflikt zwischen verschiedenen Standpunkten besteht, weil sie nicht alle gültig sein können, weil sie zueinander in Widerspruch stehen. Konsistenz ist aber auch an sich ein Bewertungskriterium für Wissenschaftler, dem Aussagen in der kritischen, argumentativen Diskussion standhalten müssen (siehe Kapitel 2.1.2, S. 26, Merkmal (2)). Dies kann in Verbindung mit wissenschaftlichen Kontroversen verdeutlicht werden.

Science has inherent limitations (ebd., S. 44): Wissenschaftliche Kontroversen zeigen Grenzen naturwissenschaftlichen Denkens und Arbeitens auf, da eines ihrer wesentlichsten Merkmale die Unauflösbarkeit des Konfliktes zwischen den unterschiedlichen Standpunkten ist (siehe Kapitel 2.1.2, S. 28, Merkmal (5)). Das heißt, dass eben keine naturwissenschaftlichen Mittel zu Verfügung stehen, um im kontroversen Diskurs zu einer unbestreitbaren Entscheidung zu gelangen. Hier wird eine Grenze naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung erreicht und offengelegt. Dazu passen auch die Grenzen der Naturwissenschaft, wie sie Korte (2015, S.19) nennt:

> Naturwissenschaftliche Theorien
>
> 1. lassen sich nicht ableiten oder beweisen, sondern höchstens widerlegen,
> 2. sind unsicher und können sich fundamental wandeln,
> 3. lassen sich sowohl hinsichtlich ihrer Übereinstimmung mit den Erfahrungstatsachen als auch anderer Qualitätskriterien nicht völlig eindeutig und objektiv beurteilen,
> 4. werden in ihrer Struktur, ihren Inhalten und ihrem Wandel in beträchtlichem Maße durch gesellschaftliche Faktoren beeinflusst.

Vor allem die ersten drei von Korte angegebenen Grenzen spiegeln sich in der Unentscheidbarkeit einer wissenschaftlichen Kontroverse wider. Denn wenn wissenschaftliche Aussagen streng beweisbar wären, wenn sie endgültig gesichert werden könnten und vollständig objektiv entscheidbar wären, dann gebe es vermutlich keine wissenschaftlichen Kontroversen. Insofern können anhand solcher Kontroversen die Grenzen wissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung aufgezeigt werden.

New knowledge must be reported clearly and openly (McComas und Olson 1998,, S. 45): Die Bedeutung des öffentlichen Austauschs in der Wissenschaft kann bei der Beschäftigung mit wissenschaftliche Kontroversen direkt nachvollzogen werden. Der öffentliche Diskurs innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft zählt zu den Merkmalen einer wissenschaftlichen Kontroverse (siehe Kapitel 2.1.2, S. 26, Merkmal (3)). Er ist unverzichtbar für die Kommunikation zum Für und Wider einer wissenschaftlichen Position und notwendig für einen kritischen Diskurs unter Wissenschaftlern zu kontroversen Fragestellungen. Inwieweit wissenschaftliche Erkenntnisse klar und öffentlich dargestellt werden, kann am Beispiel wissenschaftlicher Kontroversen als *Nature-of-Science*-Aspekt reflektiert werden.

Scientists work collaboratively (ebd.): Wissenschaftler gewinnen ihre Erkenntnisse häufig in der direkten oder indirekten Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern. Dabei sollte unter „Zusammenarbeit“ aber nicht nur Kooperation, sondern auch Konkurrenz oder besser gegenseitige Kritik (siehe Kapitel 2.1.2, S. 26, Merkmal (2) und (3)) verstanden werden können. So ist Dascal (2006, S. 22) davon überzeugt:

> Die gemeinsame Anstrengung, die für die Erkenntnisgewinnung notwendig ist, schließt Meinungsverschiedenheiten und Auseinandersetzungen nicht aus; vielmehr sind dies wesentliche Merkmale der Wissenschaft.

Darum sei „echte Kooperation, die zur Entwicklung des Wissens führt, entweder kritisch oder sinnlos“ (ebd.). In diesem Sinne zeigen wissenschaftliche Kontroversen auf, in welcher Art und Weise Wissenschaftler zusammenarbeiten können - sowohl kooperativ, als auch kompetitiv.

New scientific ideas have frequently been rejected (McComas und Olson 1998,, S. 46): Kontroversen in der Wissenschaft können dadurch entstehen, dass ein vorhandener Konsens durch eine neue Theorie herausgefordert wird oder das für ein noch nicht erklärbares Phänomen verschiedene Erklärungsansätze präsentiert werden (siehe Kapitel 2.1.2, S. 27, Merkmal (4)). Diese neuen Ideen und Lösungsansätze müssen sich dann im wissenschaftlichen Diskurs (siehe Kapitel 2.1.2, S. 26, Merkmal (2) und (3)), wie er in Kontroversen zu Tage tritt, behaupten und werden gegebenenfalls verworfen. Insofern kann durch das Studium wissenschaftlicher Kontroversen bewusst werden, wie bzw. ob sich bestimmte wissenschaftliche Theorien (Ideen) durchsetzen und dass auf diesem Weg immer wieder verschiedene Ansätze aufgegeben werden müssen.

Science has been at the center of many controversies (ebd.): Bei der Formulierung dieses *Nature-of-Science*-Aspekts von McComas und Olson wird nicht ganz klar, ob tatsächlich Kontroversen <u>in</u> der Wissenschaft oder Kontroversen <u>über</u> die Wissenschaft gemeint sind, wie sie Wazeck (2013, vgl. S. 165) unterscheidet. Möglicherweise soll ausgedrückt werden, dass auch Wissenschaft nicht frei von Kontroversität ist.

Nature-of-Science-Aspekte nach Osborne et al. (2003)

Auf der Suche nach einem Katalog konsensfähiger *Nature-of-Science*-Inhalte, haben Osborne et al. (2003) in einer internationalen dreistufigen Delphi-Studie 23 Experten (Lehrende der Naturwissenschaften, Naturwissenschaftler, Philosophen, Historiker und Wissenschaftssoziologen) befragt. Im Ergebnis ließen sich dadurch neun verschiedene Hauptthemen für *Nature of Science* im naturwissenschaftlichen Unterricht herauskristallisieren. Bis auf „Creativity" lassen sich die folgenden acht *Nature-of-Science*-Aspekte dabei in unmittelbaren Zusammenhang mit wissenschaftlichen Kontroversen bringen:

Science and Certainty (ebd., S. 701): Hierzu gehört neben der Vorläufigkeit wissenschaftlichen Wissens auch ein Verständnis dafür, „why much scientific knowledge, particularly that taught in school science, is well-established and beyond reasonable doubt, and why other scientific knowledge is more open to legitimate doubt" (ebd.). Dieser Punkt dürfte die Fokussierung auf wissenschaftliche Standards und Gütekriterien beinhalten, da sich daran festmachen lässt, inwiefern Wissensbestände wohl akzeptiert werden können oder gegebenenfalls Gegenstand aktueller Debatten, zum Beispiel auch in wissenschaftlichen Kontroversen (siehe Kapitel 2.1.2, S. 28, Merkmal (5)) sind. Wissenschaftliche Kontroversen als solche einordnen zu können, adressiert also genau diesen *Nature-of-Science*-Aspekt.

Historical Development of Scientific Knowledge (ebd.): Dieser Aspekt kann besonders mithilfe historischer wissenschaftlicher Kontroversen vermittelt werden, aber auch die Auseinandersetzung mit aktuellen wissenschaftlichen Kontroversen kann beleuchten, welche Ideengeschichten zu bestehenden unaufgelösten Diskursen unter Wissenschaftlern führen und wie sich wissenschaftliche Erkenntnisse und Theorien stets weiterentwickeln.

Scientific Methods and Critical Testing (ebd., S. 702): Auch die Rolle der experimentellen Methode in den Naturwissenschaften steht in Zusammenhang mit wissenschaftlichen Kontroversen, wie bereits zum Punkt *The Empirical Nature of Scientific Knowledge* unter den von Lederman et al. (2002) bzw. McComas und Olson (1998) genannten Aspekten ausgeführt wurde.

Analysis and Interpretation of Data (Osborne et al. 2003, S. 702): Die Bedeutung dieses *Nature-of-Science*-Elementes für wissenschaftliche Kontroversen wurde ebenfalls unter dem von Lederman et al. (2002) beschriebenen Aspekt *The Empirical Nature of Scientific Knowledge* geklärt. Ganz ähnlich betonen auch Osborne et al. (2003, S. 702) die Interpretationsbedürftigkeit wissenschaftlicher Daten:

> Scientific knowledge claims do not emerge simply from the data but through a process of interpretation and theory building that can require sophisticated skills. It is possible for scientists legitimately to come to different interpretations of the same data, and therefore to disagree.

Hypothesis and Prediction (ebd.): In wissenschaftlichen Kontroversen ist eine Entscheidung für eine bestimmte wissenschaftliche Position per Definition nicht möglich. Um eine solche Entscheidung aber nach Möglichkeit in Zukunft herbeiführen zu können, stellen Wissenschaftler Hypothesen auf, für die eine empirische Bestätigung noch aussteht und versuchen Vorhersagen aus ihren Theorie abzuleiten, die für ein Urteil in der kontroversen Fragestellung genutzt werden können.

Diversity of Scientific Thinking (ebd.): Wie bereits zum *Nature-of-Science*-Aspekt *Myth of The Scientific Method* (Lederman et al. 2002) für wissenschaftliche Kontroversen erläutert, sollte aufgezeigt werden, dass in der Wissenschaft eine Bandbreite methodischer Vorgehensweisen zum Einsatz kommt.

Science and Questioning (Osborne et al. 2003, S. 703): Wissenschaftliche Kontroversen zeigen, wie wissenschaftliche Fragestellungen zu weiteren und möglicherweise noch tiefgründigeren Fragen und Problemen führen können (siehe Kapitel 2.1.2, S. 29, Merkmal (6)). Osborne et al. beschreiben dies als „cyclical process of asking questions and seeking answers" (ebd.).

Cooperation and Collaboration in Development of Scientific Knowledge (ebd., S. 704): Dieses *Nature-of-Science*-Element und seine Relevanz im Zusammenhang mit wissenschaftlichen Kontroversen, lassen sich analog zum Aspekt *Scientists work collaboratively* von McComas und Olson (1998) verstehen. Auch Osborne et al. (2003, S. 704) beschreiben Wissenschaft als „communal and competitive activity". Sie sehen Aushandlungs- bzw. Einigungsprozesse in der wissenschaftlichen Gemeinschaft als wesentlich an und nennen hierzu als Beispiel die Bedeutung von Peer-Review-Verfahren (siehe auch Kapitel 2.1.2, S. 26, Merkmal (2) und (3)).

Nature-of-Whole-Science nach Allchin (2011)

Einen vor allem dem Ziel nach anderen Ansatz wählt Allchin. Er spricht sich gegen eine Beschränkung von *Nature of Science* auf bestimmte Aspektlisten aus (vgl. Allchin 2011, S. 523 f.). Diese allein hätten nur wenig Relevanz in Bezug auf die *Scientific Literacy* der Lernenden (vgl. ebd., S. 524). Beispielsweise sei die Frage nach dem Wesen eines Experiments zunächst rein philosophisch und wenig bedeutsam im naturwissenschaftlichen Unterricht. Wichtiger sei demgegenüber, inwieweit experimentelle Daten verlässlich sein können und evidente Ergebnisse liefern (vgl. ebd., S. 523). Deshalb versucht Allchin seinen eigenen *Nature-of-Whole-Science*-Ansatz konkret ausgehend von der übergeordneten Zielperspektive einer *Scientific Literacy* zu entwickeln (vgl. Allchin, Andersen und Nielsen 2014, S. 697) und stellt als vorrangiges Prinzip seines Ansatzes heraus:

> Students should develop an understanding of how science works *with the goal of interpreting the reliability of scientific claims in personal and public decision making* [Hervorhebung im Original]. (Allchin 2011, S. 521)

Damit rückt Allchin die Bewertung der Verlässlichkeit wissenschaftlicher Erkenntnisse in den Fokus seines „funktionalen" (ebd., S. 524) *Nature-of-Whole-Science*-Verständnisses. Allchin geht davon aus, dass Kompetenzen zur Beurteilung der Glaubwürdigkeit von Aussagen oder Argumenten unverzichtbare Komponenten von *Scientific Literacy* sind (vgl. ebd., S. 521). Dies sei notwendig, da auch Fachexperten nicht immer dieselbe Meinung teilen. Darum ist Allchin überzeugt, dass es einen Lernbedarf für „additional resources to assess the nature of the disagreement and the relative status of alternative claims" (ebd., S. 522) gibt. Hier wird ein klarer Zusammenhang zu wissenschaftlichen Kontroversen hergestellt. Deren Existenz erfordert im Sinne Allchins förmlich ein Verständnis von *Nature of Science*. In wissenschaftlichen Kontroversen stellen sich zwangsläufig Fragen nach den Belegen und Unsicherheiten für einzelne wissenschaftliche Standpunkte, so dass die Zuverlässigkeit wissenschaftlicher Aussagen und Argumente zentral ist (siehe auch Kapitel 2.1.2, S. 26, Merkmal (2)). Dies stimmt mit der

Zielstellung Allchins überein, Wissen darüber zu vermitteln, wie in der Wissenschaft zuverlässige Erkenntnisse gewonnen werden, aber auch welche Grenzen die wissenschaftliche Praxis dabei hat (vgl. ebd., S. 527 f.). Konkret nennt Allchin (ebd.) verschiedene „Dimensionen" der Zuverlässlichkeit (der Reliabilität) in der Wissenschaft, die darstellen sollen, „how science works" (ebd., S. 524). Dabei zählt er zum Beispiel zu den sozialen Aspekten der Handlungen von Wissenschaftlern (ebd., S. 527):

- collaboration or competition among scientists
- forms of persuasion
- credibility
- peer review
- limits of alternative theoretical perspectives and criticism
- resolving disagreement
- academic freedom

Viele dieser Bezugspunkte besitzen Schnittmengen mit wissenschaftlichen Kontroversen, so dass davon auszugehen ist, dass sich Kontroversen für eine Thematisierung entsprechender Elemente des *Nature-of-Whole-Science*-Ansatzes im Unterricht eignen.

Allchin, Andersen und Nielsen (2014) schlagen für die Vermittlung aktuelle Fallbeispiele vor, zu denen sie auch Socio-Scientific Issues zählen. Durch den Einsatz solcher Fallbeispiele könne man Lernenden „critical aspects of ‚science-in-the-making', such as uncertainty, tentativeness, subjectivity, multiple perspectives, the role of funding, political interests, and social embeddedness of science" (ebd., S. 467) näher bringen. Eine Schwierigkeit bei Socio-Scientific Issues, so Allchin, Andersen und Nielsen, sei jedoch, dass diese zum Teil auch Wertefragen betreffen (vgl. ebd.). Durch die Komplexität und zuweilen hohe Emotionalität bei Socio-Scientific Issues kann eine nüchterne, rationale Betrachtung von Argumenten und Aussagen in einer Debatte, aber auch von *Nature-of-Science*-Aspekten verkompliziert werden. So gesehen dürften wissenschaftliche Kontroversen, die nicht noch domänenübergreifender Perspektiven bedürfen und meist keine Werteurteile erfordern, eine günstige Alternative solcher aktuellen Fallbeispiele sein. Schließlich lassen sich diese als Lerngelegenheiten nutzen, um Schüler darin zu stärken, eine „well-informed analysis" (Allchin 2012, S. 696) für bestimmte Situationen und vorgebrachte Argumentationen vorzunehmen. Insgesamt verdeutlicht der Ansatz Allchins die enge Verbindung zwischen *Nature of Science* und wissenschaftlichen Kontroversen.

Trotz der unterschiedlichen Zugänge und Konzeptualisierungen von *Nature of Science* konnten zum Teil starke Zusammenhänge zu wissenschaftlichen Kontroversen aufgezeigt werden. Damit einher geht auch ein Potenzial, wissenschaftliche Kontroversen als *Nature-of-Science*-Lerngelegenheit für den Physikunterricht zu nutzen. Um dieses Potenzial genauer bestimmen zu können, soll in den nächsten Abschnitten vorgestellt werden, welche Erkenntnisse aus Studien bekannt sind, in denen *Nature-of-Science*-Aspekte im Kontext von Kontroversen untersucht worden sind.

2.3.2 *Nature-of-Science*-Verständnis von Schülern

In diesem Kapitel soll im ersten Teil (Aspekte von Kontroversität in der Wissenschaft im *Nature-of-Science*-Verständnis) skizziert werden, wie die Vorstellungen auf Seiten der Schüler zu *Nature of Science* anhand empirischer Ergebnisse fachdidaktischer Forschung eingeschätzt werden können und inwiefern diese Vorstellungen auch Aspekte von Kontroversität in der Wissenschaft, wie die Vorläufigkeit wissenschaftlichen Wissens oder soziale Aushandlungsprozesse, enthalten.

Im zweiten Teil (Zusammenhänge zwischen dem *Nature-of-Science*-Verständnis und der Auseinandersetzung mit kontroversen Themen) wird beschrieben, welche Erkenntnisse aus Untersuchungen vorliegen, die das *Nature-of-Science*-Verständnis von Lernenden im Zusammenhang mit der Auseinandersetzung zu einem kontroversen Thema erheben. Da hierzu allerdings kaum Studien mit Bezug zu wissenschaftlichen Kontroversen vorliegen, wohl aber zu Socio-Scientific Issues, werden auch Forschungsarbeiten einbezogen, deren Gegenstand diese Art von fachübergreifenden, wissenschaftsbezogenen Kontroversen sind. Auch wenn damit keine einfachen Rückschlüsse auf den Kontext wissenschaftlicher Kontroversen möglich sind, ist eine Betrachtung dieser Ergebnisse dennoch interessant, da auch Socio-Scientific Issues die Merkmale von Kontroversen abbilden und damit trotz zu beachtender Unterschiede Parallelen zu wissenschaftlichen Kontroversen gezogen werden können.

Zentrale Fragen dieses Kapitels sind dabei:

- Sind die *Nature-of-Science*-Vorstellungen von Schülern in Bezug auf Kontroversen in der Wissenschaft angemessen? (siehe Teil 1 und Teil 2)
- Inwiefern beeinflusst das *Nature-of-Science*-Verständnis die Auseinandersetzung mit einer wissenschaftlichen Kontroverse? (siehe Teil 2)
- Inwiefern beeinflusst umgekehrt die Auseinandersetzung mit einer wissenschaftlichen Kontroverse das *Nature-of-Science*-Verständnis? (siehe Teil 2)

Aspekte von Kontroversität in der Wissenschaft im *Nature-of-Science*-Verständnis

Leuders et al. (2019, vgl. S. 22) gelangen aufgrund der Studienlage in der Fachdidaktik und Psychologie zu der Einschätzung, dass das Wissenschaftsverständnis von Schülern insgesamt Mängel aufweist. So seien Schüler jeden Alters überwiegend naive Realisten. Auch Höttecke und Hopf (2018, vgl. S. 278) sehen es als problematisch an, dass die Studienlage zu *Nature-of-Science*-Vorstellungen von Schülern häufig einen naiven Realismus widerspiegelt, bei dem Schüler davon ausgehen, dass die naturwissenschaftliche Beschreibung Phänomene der Natur real und exakt erfasst, so wie sie sind. Da Schüler zusätzlich überzeugt seien, die Lehrbücher der Schule enthielten statisches unantastbares Wissen, sei es nur verständlich, dass sie nicht nachvollziehen könnten, wie Wissenschaftler in kontroversen Auseinandersetzungen um Erkenntnisse ringen. In seinem Review zur Natur der Naturwissenschaften stellt Höttecke (2001, vgl. S. 21) differenziert dar, wie unterschiedlich die Studienergebnisse zur Schülerperspektive auf den Status wissenschaftlichen Wissens sind. Während zum einen gezeigt wird, dass Schüler wissenschaftliche Erkenntnisse als sicher und gefestigt betrachten, so dass Vorläufigkeit

nicht als Aspekt des Wesens naturwissenschaftlichen Wissens gesehen wird, gelangen andere Untersuchungen zu der Einschätzung, dass Schüler durchaus die Dynamik wissenschaftlicher Erkenntnisse und deren Veränderlichkeit bzw. Vorläufigkeit erkennen. Dementsprechend fast Höttecke zusammen, dass unter Schülern verschiedene Vorstellungen zur Natur der Naturwissenschaften vorgefunden werden können. Bei der Entstehung wissenschaftlichen Wissens werde nur in geringem Maße die Bedeutung von Aushandlungsprozessen innerhalb eines auch sozialen Kontextes durch die Schüler wahrgenommen. Insgesamt betrachtet Höttecke die Schülervorstellungen im Bereich von *Nature of Science* als unangemessen. Ursache solcher Defizite sei dabei das im Unterricht vermittelte Bild der Physik, ohne den notwendigen Einbezug historischer Hintergründe und ohne Beleuchtung sozialer Aspekte im Erkenntnisprozess, aber der Darstellung unveränderlicher Wissensbestände. Damit teilt Höttecke die Schlussfolgerung, die Lederman (2007, vgl. S. 861) in seiner Analyse der Forschungsarbeiten zum *Nature-of-Science*-Verständnis von Schülern gewinnt. Auch er beschreibt bedeutende Defizite in diesem Bereich.

Ein genaueres Bild, das zu den obigen Gesamteinschätzungen passt, zeichnen die folgenden konkreten Forschungsergebnisse. In einer quantitativen Studie mit 207 hessischen Schülern der Sekundarstufe I untersuchten Kremer und Mayer (2013, vgl. S. 77) das *Nature-of-Science*-Verständnis der Teilnehmenden zu Beginn eines Schuljahres und zu dessen Ende. Dabei zeigten Schüler höherer Klassenstufen stabile, adäquate Vorstellungen. Für Schüler der Klassenstufen fünf bis acht konnte eine Entwicklung hin zum besseren Verständnis der Vorläufigkeit und Entwicklung wissenschaftlicher Erkenntnisse festgestellt werden (ebd., S. 95). Diese Befunde decken sich im Wesentlichen mit den Ergebnisse von Urhahne, Kremer und Mayer (2008). Die Forschenden erhoben ebenfalls Daten von Schülern der Sekundarstufe I ($N = 272$). Auch sie schätzen ein, dass Schüler mit wachsender Klassenstufe angemessenere *Nature-of-Science*-Vorstellungen entwickeln (vgl. ebd., S. 85). Auf der anderen Seite deuten die Daten jedoch auf teilweise defizitäre Vorstellungen hin. Konkret konnten diese für die beiden Aspekte Kreativität von Wissenschaftlern und Eigenschaften wissenschaftlicher Theorien (Sparsamkeit) identifiziert werden (vgl. ebd., S. 87). Eher zufriedenstellend, wenn auch nicht durchgängig, seien die Schülervorstellungen in den Bereichen „Herkunft, Sicherheit, Entwicklung und Rechtfertigung des naturwissenschaftlichen Wissens“ (ebd.).

Ergebnisse in direktem Zusammenhang mit Kontroversität als Wesensmerkmal der Naturwissenschaften liefern die folgenden beiden Studien. In einer Untersuchung mit 153 Schülern einer kalifornischen Middle School ordneten Songer und Linn (1991, vgl. S. 772) die Teilnehmenden jeweils einem statischen, einem dynamischen oder einem gemischten Wissenschaftsverständnis zu. Nur 15% der Untersuchten zeigten dabei ein dynamisches Bild der Naturwissenschaften. Schüler dieser Gruppe sind sich bewusst, dass wissenschaftliche Erkenntnisse kontrovers sein können und gegebenenfalls Klärung durch neue empirische Belege erfahren. Sie akzeptieren auch die Interpretationsbedürftigkeit wissenschaftlicher Daten. Demgegenüber stehen 21% der Schüler mit einem statischen Verständnis der Natur der Naturwissenschaften, in dem verkannt wird, dass neben gut bewährten Wissensbeständen auch Kontroversen um aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse bestehen. Dementsprechend sind Schüler mit solchen Vorstellungen überzeugt, dass naturwissenschaftliche Lehrbücher unumstößliches Wissen enthielten und sich Wissenschaft nicht verändert (vgl. ebd.). Den größten Teil (63%)

der Teilnehmenden ordneten Songer und Linn einer Mischform aus dynamischem und statischem Verständnis der Wissenschaften zu.

Interessant ist in diesem Zusammenhang auch eine explorative Befragung von Schülern (Jahrgangsstufen 11 und 12) und Studierenden durch Schindler, Lehnen und Jakobs (2006). Anhand von Interviews kommen Schindler, Lehnen und Jakobs zu dem Fazit:

> Schüler sind – salopp formuliert – weit davon entfernt, Kontroversen als konstitutives Prinzip innerhalb der Wissenschaft wahrzunehmen. Kontroversen sind, so könnte man in aller Vorsicht aus den Interviews schließen, auch gar nicht erwünscht (ebd., S. 91).

Anders gestalten sich die Ergebnisse der Studierenden-Befragung. Studierende der Geistes- und Sozialwissenschaften erkennen Kontroversen in ihren Fachdomänen an, während sie diese nicht in Verbindung mit den Naturwissenschaften bringen können, deren Erkenntnisse nicht von subjektiven Faktoren und Interpretationen abhängig wären (vgl. ebd., S. 90). Wenn Studierende nicht-naturwissenschaftlicher Fächer Kontroversen nicht als wesentlichen Bestandteil der Naturwissenschaften sehen, kann vorsichtig vermutet werden, dass diese Befragten auch zur eigenen Schulzeit nicht über angemessenere Vorstellungen verfügten. Die Ergebnisse von Schindler, Lehnen und Jakobs (2006) können aufgrund der sehr kleinen Stichprobe nicht generalisiert werden, sprechen aber ebenfalls dafür, dass Schüler im Allgemeinen nicht die Bedeutung von Kontroversität in der naturwissenschaftlichen Praxis erfassen.

Als Zwischenfazit kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass die *Nature-of-Science*-Vorstellungen von Schülern prinzipiell verbesserungswürdig sind und im Speziellen gerade im Hinblick auf wissenschaftliche Kontroversen ungeeignete Schülervorstellungen verbreitet sind. Dabei könnte ein tieferes Verständnis für Kontroversität unter Naturwissenschaftlern auch den Vorstellungen über andere *Nature-of-Science*-Aspekte (siehe Kapitel 2.3.1 (ab S. 45) zuträglich sein. Somit ergibt sich die Frage, inwieweit die Auseinandersetzung mit eben diesen wissenschaftlichen Kontroversen lernförderliche Effekte auf das *Nature-of-Science*-Verständnis der Lernenden haben könnte. Fachdidaktische Erkenntnisse hierzu werden im nachstehenden Abschnitt behandelt.

Zusammenhänge zwischen dem *Nature-of-Science*-Verständnis und der Auseinandersetzung mit kontroversen Themen

Driver et al. (1996) untersuchten auf Basis zweier Fallbeispiele die Gruppendiskussionen sechzehnjähriger Schüler ($N = 48$) einer Comprehensive School. Im Vorfeld der Gruppendiskussionen mit je vier Teilnehmern erhielten diese 30 Minuten Zeit, sich mit Informationen zu einer Kontroverse zu beschäftigen. Als Fallbeispiele wurden einerseits die innerfachliche Kontroverse um die Kontinentaldrifttheorie von Alfred Wegener sowie eine Socio-Scientific Issue zur Bestrahlung von Lebensmitteln mit ionisierender Strahlung (Verlängerung der Haltbarkeit) eingesetzt. Die Daten zum ersten Fallbeispiel (wissenschaftliche Kontroverse) legen nahe, dass die Schüler Evidenz als Hauptfaktor für das Erzielen eines wissenschaftlichen Konsens sehen. Dabei besteht offensichtlich ein naives Bild, dass Evidenz in der Wissenschaft zu reinen „Wahrheiten“ führe. Empirische Daten bestimmen aus Sicht der Schüler faktisch direkt die Theoriebildung (vgl. ebd., S. 128). Die Auswertung für beide Fallbeispiele insgesamt

zeigt, dass die Schüler kein Bewusstsein für die Möglichkeit unterschiedlicher Interpretationen der selben Daten besitzen. In den Gruppen wurde häufig über den Mangel von Fakten und Nachweisen diskutiert aus denen die Theorien dann praktisch von selbst erwachsen würden (vgl. ebd., S. 132). Auch der Einfluss sozialer Faktoren bei der Entwicklung von Erkenntnissen wird von den Lernenden unterschätzt. Stattdessen versuchen sie Strategien zur Bewältigung sozialer Konflikte, die ihnen aus dem Alltag bekannt sind, auf die Kontroversen in den Fallbeispielen zu übertragen. So wird beispielsweise vorgeschlagen, dass die Kontroverse dadurch beigelegt werden könnte, dass Wissenschaftler mit unterschiedlichen Meinungen ein Experiment nur gemeinsam durchführen müssten oder ein Unabhängiger zwischen den verschieden Standpunkten vermitteln solle (vgl. ebd., S. 133). Zusammenfassend betrachten Driver et al. (1996, vgl. S. 134) die Ansichten der Schüler im Umgang mit den beiden Kontroversen als wenig tiefgründig und gehen daher davon aus, dass es konkreter Maßnahmen bedarf, um das Verständnis der Schüler zu verbessern.

Weitere Einblicke in die Auseinandersetzung mit Kontroversen konnten Schommer (1990) sowie Kardash und Scholes (1996) in ihren Studien mit Psychologie-Studierenden in Einführungskursen gewinnen. Da sich die Studierenden jeweils noch in einem wenig fortgeschrittenem Stadium ihres Studiums befanden, dürften sich ihr Verständnis und ihre Reaktionen nicht zu sehr von Schülern unterscheiden, wenngleich sie nicht mit diesen gleichzusetzen sind. Schommer (1990) konfrontierte die Studienteilnehmer ($N = 86$) mit Textauszügen, zu einer Kontroverse um die Einnahme von Vitamin B6 und dessen Auswirkung auf verschiedene Krankheitsbilder. Anschließend sollten die Teilnehmenden eine schriftliche Zusammenfassung und Schlussfolgerung zu diesen Informationen verfassen, die von den Forschenden ausgewertet wurden. Dabei stieß Schommer auf einen engen Zusammenhang zwischen dem *Nature-of-Science*-Verständnis und der formulierten Schlussfolgerung der Studierenden: „The more the students believed in certain knowledge, the more likely they were to write absolute conclusions“ (ebd., S. 502). Vergleichbare Ergebnisse lieferte die Untersuchung von Kardash und Scholes (1996), die ihren Befragten ($N = 96$) einen Text mit zwei widersprüchlichen Positionen zu der Frage, ob das HI-Virus AIDS verursacht, vorlegten. Auch hier wurden die Studierenden gebeten, den Text um einen letzten Absatz zu ergänzen. Die Angemessenheit dieser Darstellungen war dabei abhängig von der Vorstellung zur Sicherheit wissenschaftlichen Wissens, den eigenen vorausgehenden Überzeugungen zum Zusammenhang zwischen HIV und AIDS sowie der Bereitschaft zur kognitiven Aktivität. Diejenigen, die naturwissenschaftliche Erkenntnisse als sicher betrachten, im Vorfeld bereits eine bestimmte Position deutlich vertreten und wenig Interesse an kognitiven Herausforderungen haben, vernachlässigten die Kontroversität der beiden Positionen. Umgekehrt waren die Schlussfolgerungen der Studierenden reflektierter und wurden den kontroversen Positionen eher gerecht, wenn die Befragten Wissen nicht als sicher feststehend ansahen, zuvor nicht von einem der beiden Standpunkte stark überzeugt waren und eine größere kognitive Leistungsbereitschaft aufwiesen (vgl. ebd., S. 269). Somit scheint unter anderem das *Nature-of-Science*-Verständnis zur (Un)sicherheit wissenschaftlicher Erkenntnisse die Beurteilung von Kontroversen zu beeinflussen.

Da die Studienlage zur Untersuchung von *Nature of Science* in Verbindung mit wissenschaftlichen Kontroversen bisher wenig umfangreich ist, werden nun Forschungsergebnisse zusammengefasst, die zwar im Kontext von Socio-Scientific Issues entstanden sind, aber wegen ih-

res Forschungsinteresses im Bereich von *Nature of Science* als durchaus relevant erscheinen. Selbstverständlich besitzen diese Ergebnisse nur eingeschränkt Bezugsmöglichkeiten zu wissenschaftlichen Kontroversen.

Reis und Galvão (2004) untersuchten in einer qualitativen Studie mit 86 Schülern, inwiefern die Auseinandersetzung mit Socio-Scientific Issues (z. B. Klonen, genetisch veränderte Lebensmittel) die Konzepte der Teilnehmenden über Wissenschaftler und die Wissenschaft verändert. Dazu beantworteten die Teilnehmenden einen Fragebogen mit offenen Fragen und schrieben selbst eine kleine Science-Fiction-Geschichte. Im Anschluss daran wurden halbstrukturierte Interviews geführt. Tatsächlich konnten die Forschenden einen Einfluss auf die *Nature-of-Science*-Vorstellungen der Schüler ermitteln. Sie geben unter anderem an, dass die Schüler den Einfluss finanzieller, persönlicher und sozialer Faktoren auf die wissenschaftliche Praxis erkannten. Daneben konnten auch Vorstellungen gefunden werden, die weniger für wissenschaftliche Kontroversen bedeutsam sind, sonder eher typisch für Socio-Scientific Issues, wie der Einfluss von Werten und die Idee, dass die Wissenschaft ethisch reguliert werden sollte (vgl. ebd., S. 1631).

Dass die Verbesserung des *Nature-of-Science*-Verständnisses von Schülern zwar bei direkter Verknüpfung von *Nature-of-Science*-Aspekten mit einem kontroversen, wissenschaftsbezogenem Thema im Unterricht erzielt werden kann, aber nicht unbedingt einer Lerneinheit überlegen ist, die *Nature-of-Science*-Aspekte unabhängig von einer solchen Problematik behandelt, zeigen Khishfe und Lederman (2006). Am Beispiel des Klimawandels untersuchen sie die Entwicklung der *Nature-of-Science*-Konzepte von Schülern einer neunten Klasse (High School) in Chicago. Dazu wurden in der Studie im Verlauf von sechs Wochen zwei Klassen von ein und derselben Lehrkraft unterrichtet. In einer der beiden Klassen wurden *Nature-of-Science*-Aspekte immer in Verbindung mit dem Unterrichtsthema globale Erwärmung behandelt („integrated“). Die andere Klasse beschäftigte sich thematisch ebenfalls mit der Erderwärmung, allerdings wurde *Nature of Science* hier getrennt davon vermittelt („nonintegrated“). Die Auswertung von Fragebogen (offene Fragen) und halbstrukturierten Interviews zeigt einen ganz leichten Vorteil des „integrated“-Zugangs für die Schüler-Konzepte zu *Nature of Science*. Allerdings betrachten Khishfe und Lederman diesen ganz klar nur als „minor impact and of little educational value“ (ebd., S. 414). Vielmehr betonen sie, dass es keinen wirklichen Nachweis zur Überlegenheit einer der beiden Vermittlungsvarianten gäbe. Wichtiger sei, dass die *Nature-of-Science*-Aspekte explizit im Unterricht thematisiert werden (vgl. ebd.). Was die Studie aber auch demonstriert, ist, dass eine Vermittlung von *Nature-of-Science*-Inhalten in Anbindung an eine wissenschaftsbezogene Kontroverse nicht minder effektiv ist, als ein Zugang, bei dem *Nature of Science* ohne einen solchen thematischen Bezug behandelt wird.

Auf der anderen Seite scheint es möglich zu sein, dass vorhandene *Nature-of-Science*-Vorstellungen beeinflussen, wie Lernende mit Kontroversen umgehen. Dieser Zusammenhang wird durch verschiedene Studien nahegelegt. Dazu kann in bestimmten Ansätzen auch ein Forschungsprojekt von Mason und Boscolo (2004) gezählt werden, für das 65 italienische Schüler der Jahrgangsstufen 11 und 12 befragt wurden. Nachdem die Schüler einen Fragebogen zur Erhebung der epistemologischen Überzeugungen, die in engem Zusammenhang mit *Nature of Science* stehen (vgl. Neumann und Kremer 2013), bearbeiteten, wurde sie eine Woche später mit einem Text konfrontiert, der Für und Wider genetisch modifizierter Lebensmittel

kontrovers darstellte. Die Teilnehmenden beantworteten anschließend Fragen zum Text und sollten eine Zusammenfassung bzw. Schlussfolgerung zum Text schreiben. Dabei fanden die Forschenden heraus, dass das Verständnis und die Interpretation des Textes abhängig von den jeweiligen epistemologischen Überzeugungen war (vgl. Mason und Boscolo 2004, S. 121). Die Auswertung ergab, dass diejenigen die Kontroverse angemessener deuteten und verstanden, die über mittlere bis fortgeschrittene epistemologische Überzeugungen verfügten (vgl. ebd., S. 116). Schüler mit niedrigen Werten im Bereich der epistemologischen Überzeugungen schnitten auch bei der Beantwortung der Fragen zum Text schwächer ab (vgl. ebd., S. 118). Darüber hinaus lassen sich in der Studie Hinweise darauf finden, dass die Beschäftigung mit einem kontroversen Thema die Reflexion von *Nature-of-Science*-Aspekten ermöglicht: Die Teilnehmenden sollten, während sie den Text lasen, Kommentare zur Kontroverse notieren. Bei der Analyse dieser Inhalte konnten die Autoren der Studie die Kategorie „the role of science" bilden (vgl. ebd., S. 119). Dies zeigt, wie die Auseinandersetzung mit einer Kontroverse auch zu einer Thematisierung von *Nature-of-Science*-Aspekten beitragen kann.

Auch Zeidler et al. (2002) gehen davon aus, dass das *Natur-of-Science*-Verständnis von Schülern einen Einfluss auf deren Umgang mit einer Kontroverse haben könnte. Die Autoren sammelten Daten von insgesamt 82 Schülern (9.-12. Klasse), die in 41 Paare aufgeteilt wurden. Den Paaren wurden im Rahmen der Studie Fragen zu ethischen Problemstellungen in Bezug auf den Einsatz von Tieren zu Forschungszwecken gestellt, die sie diskutieren sollten. Bei der Suche nach einem Zusammenhang zwischen den eigenen *Nature-of-Science*-Vorstellungen der Schüler und deren Beurteilung bzw. Entscheidung bei dieser Socio-Scientific Issue konnten allerdings nur wenige klare Fundstellen erkannt werden (vgl. ebd., S. 359). Insgesamt geben die Forschenden hierzu verschiedene exemplarische Fälle an: Im ersten Fall beschreiben die Autoren, wie eine Teilnehmerin davon überzeugt ist, dass unterschiedliche wissenschaftliche Positionen lediglich verschiedene persönliche Meinungen von Wissenschaftlern sind (*Nature-of-Science*-Konzept), von denen Daten dann so interpretiert würden, dass die eigene Meinung gestützt werde (vgl. ebd.). Als weiteres Beispiel geben Zeidler et al. den Fall einer Teilnehmerin an, welche die Ansicht vertritt, dass wissenschaftliche Erkenntnisse sich von bloßen Meinungen durch die vorhandene Evidenz unterscheiden. Dieselbe Teilnehmerin zeigt im Kontext der Socio-Scientific Issue aber ein unangemessenes Verständnis einer solchen Evidenz und akzeptiert einseitige Informationen einer einzigen Quelle als hinreichend evident für eine bestimmte Meinung, ohne diese weiter zu prüfen oder zu hinterfragen (vgl. ebd., S. 360). Hier wird deutlich, wie eine wenig elaborierte Vorstellung von Evidenz die Beurteilung einer komplexen Problemstellung (Socio-Scientific Issue) beeinträchtigen kann. Hinzukommend konnten die Forschenden bei einigen Schülern eine teilweise (zu) starke Trennung zwischen wissenschaftlichem Wissen einerseits und persönlichen Meinungen anderseits finden. Diese führte bei den entsprechenden Schülern dazu, dass sie individuelle Meinungen scheinbar gänzlich unabhängig von Erkenntnissen der Wissenschaft sahen und davon ausgingen, dass Meinungen auch durch wissenschaftliche Fakten nicht verändert werden könnten (vgl. ebd.). Aufgrund ihrer Ergebnisse schlussfolgern Zeidler et al.:

> With a more robust understanding of the NOS, students will be more likely to address moral and ethical dilemmas from a scientific point of view including evaluation of evidence. By integrating multiple perspectives with their own metaco-

> gnitive activities (e.g., reflective thinking), students may become better skilled at making logical and scientific decisions on socioscientific issues. (ebd., S. 362)

Übertragen auf wissenschaftliche Kontroversen würde dies bedeuten, dass adäquate *Nature-of-Science*-Vorstellungen wichtig für eine fundierte, logische und reflektierte Beurteilung wissenschaftlicher Fachinhalte sind.

Zu der Einschätzung, dass die Bewertung gegensätzlicher, kontroverser Positionen abhängig von den *Nature-of-Science*-Konzepten ist, kommen auch Sadler, Chambers und Zeidler (2004). Die Forschenden konfrontierten 84 Schüler im Alter zwischen 14 und 17 Jahren mit zwei unterschiedlichen Texten zur globalen Erderwärmung. Einer der beiden Texte führt den Klimawandel auf den Einfluss des Menschen zurück. Der andere Text geht davon aus, dass die Erwärmung keine anthropogenen Ursachen besitzt und ein ungefährliches, natürliches Phänomen sei. Zu diesen Texten wurden den Schülern offene Fragen gestellt, die sie schriftlich beantworteten. Für eine Triangulation der Daten wurden im Anschluss daran 30 Schüler zusätzlich interviewt. Im Ergebnis der Studie halten Sadler, Chambers und Zeidler fest, dass die meisten Schüler Wissenschaft im Zusammenhang mit gesellschaftlichen Einflüssen sehen und erkennen, wie verschiedene soziale Faktoren, individuelle Interessen und auch wirtschaftliche Aspekte die wissenschaftliche Praxis bedingen (vgl. ebd., S. 403). Auch die Vorläufigkeit wissenschaftlichen Wissens und „the fact that researchers can produce vastly different conclusions given different ideological positions or types of data" (ebd.) gehören zum *Nature-of-Science*-Verständnis der Befragten. Bei der Beurteilung und Deutung der kontroversen Positionen der Texte geben Sadler, Chambers und Zeidler Abhängigkeiten zu verschiedenen *Nature-of-Science*-Aspekten an, wie der Interpretation von Daten oder sozialen Faktoren (vgl. ebd., S. 405). Damit legt auch diese Studie nahe, dass die *Nature-of-Science*-Vorstellungen von Schülern auf deren Auseinandersetzung mit kontroversen Problemstellungen wirken.

Ein vergleichbares Fazit ziehen Carter und Wiles (2014) aus den Ergebnissen einer Studie mit 620 Biologie-Studierenden eines Einführungskurses. Mithilfe quantitativer Erhebungsinstrumente bestimmten die Forschenden die *Nature-of-Science*-Konzepte der Befragten, die Akzeptanz gegenüber der Evolutionstheorie sowie Einstellungen zum Klimawandel. Die Auswertung ergab, dass sowohl Veränderungen bei den Einstellungen zum Klimawandel, als auch bei der Akzeptanz der Evolutionstheorie statistisch positiv mit Veränderungen des gemessenen *Nature-of-Science*-Verständnisses korrelierten (vgl. ebd., S. 8). Daher vermuten Carter und Wiles:

> [...] a better understanding of the modern model of science may lead to changes in attitudes towards politically contentious ideas that are not scientifically contentious. (ebd.)

Zum einen werden in der Studie keine wissenschaftlichen Kontroversen untersucht und zum anderen hat man Studierende statt Schüler befragt. Allerdings befinden sich diese noch am Anfang ihrer universitären Ausbildung, so dass zumindest teilweise Ähnlichkeiten mit Schülern höherer Jahrgangsstufen bestehen werden. In jedem Fall zeigt das Forschungsprojekt aber auf, wie der Umgang mit strittigen wissenschaftsbezogenen Themen in Verbindung mit den Vorstellungen der Befragten zur Natur der Naturwissenschaften steht.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der aktuelle Forschungsstand, der hier beschrieben wurde, drei wesentliche Punkte verdeutlicht:

(a) Schülervorstellungen zu *Nature of Science* sind für Aspekte im Zusammenhang mit Kontroversität in der Wissenschaft (z. B. die Bedeutung von Evidenz, die Interpretationsbedürftigkeit wissenschaftlicher Daten und soziale Einflussfaktoren in der Wissenschaft) häufig unangemessen. (siehe Teil 1 und Teil 2)

(b) Es gibt Hinweise darauf, dass die Qualität der Auseinandersetzung bzw. der Beurteilung kontroverser, wissenschaftsbezogener Problemstellungen vom *Nature-of-Science*-Verständnis der Schüler abhängig ist. (siehe Teil 2)

(c) Kontroverse Themen mit Wissenschaftsbezug scheinen geeignet zu sein, wichtige *Nature-of-Science*-Aspekte zu thematisieren. (siehe Teil 2)

Naheliegend wäre daher, wissenschaftliche Kontroversen im Unterricht als Lerngelegenheit zu nutzen (siehe (c)), um zu versuchen, die unter (a) genannten Defizite auszugleichen. Dabei ist eine wechselseitige Wirkung zwischen vorhandenen *Nature-of-Science*-Konzepten der Schüler und deren reflektiertem Umgang mit Kontroversen in der Wissenschaft zu berücksichtigen (siehe (b) und (c)). Die damit verbundenen Herausforderungen im Unterricht bedürfen einer gezielten Unterstützung durch die Lehrkräfte, deren Rolle hierbei im nächsten Kapitel erörtert werden soll.

2.3.3 Rolle des *Nature-of-Science*-Verständnisses der Lehrkräfte

Inwieweit wissenschaftliche Kontroversen im Unterricht eine Lerngelegenheit zur Vermittlung von *Nature of Science* sein können, hängt wahrscheinlich auch von der subjektiven Auseinandersetzung der Physiklehrkräfte mit einer solchen Kontroverse, deren persönlichen Überzeugungen und dem eigenen *Nature-of-Science*-Verständnis ab. Deshalb soll sich dieses Kapitel mit der Rolle des *Nature-of-Science*-Verständnisses der Lehrkräfte befassen, um zu klären, inwieweit die *Nature-of-Science*-Konzepte der Lehrenden relevant für den Lernerfolg der Schüler in diesem Bereich sind, über welche Vorstellungen die Lehrkräfte verfügen und ob diese den Ansprüchen der Fachdidaktik gerecht werden können, und wie das *Nature-of-Science*-Verständnis der Lehrkräfte durch die Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Kontroversen beeinflusst wird.

Zielt Unterricht auf die Vermittlung adäquater *Nature-of-Science*-Konzepte ab, ist auch die eigene Perspektive der Lehrkräfte in diesem Bereich von Bedeutung. Leuders et al. (2019, vgl. S. 9) gehen davon aus, dass die Gestaltung des Unterrichts und seiner Inhalte auch vom Wissenschaftsverständnis der Lehrenden abhängig ist. Diese würden zum einen selbst angemessene Vorstellungen sowie Wissen über die Natur der Naturwissenschaften im Sinne des professionellen Fachwissens benötigen. Zusätzlich sei aber auch das fachdidaktische Wissen zur Vermittlung von *Nature-of-Science*-Inhalten im Unterricht wichtig (vgl. ebd., S. 26). Insgesamt seien fachdidaktische Studien in diesem Feld noch vergleichsweise rar, ergeben aber in der Einschätzung von Leuders et al. bisher das folgende Gesamtbild:

> Ähnlich wie viele Lernende tendieren offenbar auch Lehrkräfte in den Naturwissenschaften zu einem naiv-realistischen und empiristischen Bild von Naturwissenschaft, das die prinzipielle Vorläufigkeit naturwissenschaftlicher Erkenntnisse ignoriert und die sozialen, kreativen und konstruktiven Aspekte wissenschaftlichen Handelns übersieht. (ebd., S. 28)

Auch Höttecke und Rieß (2007, vgl. S. 2) sind der Auffassung, dass Physiklehrkräfte über ein geeignetes *Nature-of-Science*-Verständnis verfügen sollten, da im Unterricht auch implizit Vorstellungen zu *Nature of Science* vermittelt werden könnten. Somit sei es für Lehrkräfte unmöglich, *Nature of Science* komplett aus dem Unterrichtsgeschehen auszuklammern: „Gar nicht über die NdN [Natur der Naturwissenschaften] zu unterrichten, ist also nicht möglich" (ebd.; Einfügung des Verfassers). Dementsprechend müsse die Entwicklung adäquater *Nature-of-Science*-Vorstellungen ein unentbehrliches Ziel in der Lehrkräfteausbildung sein, um entsprechend defizitären Schülervorstellungen begegnen zu können, die durch unangemessene Darstellungen der eigenen Fachwissenschaft im Unterricht (z. B. Vernachlässigung der Interpretationsbedürftigkeit von Daten, Entwicklung wissenschaftlicher Erkenntnisse als linear fortschreitender Prozess, Nichtberücksichtigung der Vorläufigkeit wissenschaftlichen Wissens) befruchtet werden (vgl. ebd.).

Damit Lehrende der naturwissenschaftlichen Fächer erfolgreich bei der Integration von *Nature-of-Science*-Inhalten in ihrem Unterricht sind, benötigen sie fachdidaktische Handlungskompetenz. In seinem Modell der „Teacher knowledge domains for teaching *with* and *about* NOS" beschreibt Abd-El-Khalick (2013) Elemente eines speziellen fachdidaktischen Wissens für *Nature of Science* (NOS PCK). Um angemessen im Unterricht mit Aspekten zu *Nature of Science* umzugehen bzw. diese in die Konzeption des eigenen Unterrichts mit einbeziehen zu können, sind demnach drei „Wissensdomänen" der Lehrenden entscheidend (vgl. ebd., S. 2100):

- Verständnis fachwissenschaftlicher Inhalte
- pädagogisches Verständnis sowie Fähigkeiten für: schülerzentrierten Unterricht, forschendes Lernen, Berücksichtigung und Evaluation der Schülervorstellungen (Lernfortschritt)
- eigenes *Nature-of-Science*-Verständnis

Gemäß des Modells definiert sich das NOS PCK als Schnittmenge dieser drei Bereiche. Die Bedeutung des ersten Punktes kann durch eine Studie von Schwartz und Lederman (2002) gestützt werden. Im Fall-Vergleich zweier Lehrkräfte (case study) stellte sich heraus, dass ein gutes Verständnis sowohl der Fachinhalte als auch der *Nature-of-Science*-Aspekte (dritter Punkt) zentral für die Umsetzung von *Nature-of-Science*-Lerngelegenheiten im Unterricht sein dürfte (vgl. ebd., S. 230).

Obwohl Abd-El-Khalick (2013) das *Nature-of-Science*-Verständnis der Lehrkräfte als „core domain of knowledge relevant to teaching with and about NOS [*Nature of Science*]" (ebd., S. 2099; Einfügung des Verfassers) ansieht, darf dessen Einfluss auf das *Nature-of-Science*-Verständnis der Schüler nicht als unmittelbar betrachtet werden: Auch wenn Lehrkräfte über geeignete *Nature-of-Science*-Konzepte verfügen, bedeutet das nicht, dass sie automatisch dementsprechende Lernziele in ihrem Unterricht verfolgen, so dass Schüler Gelegenheit erhalten,

etwas über das Wesen der Naturwissenschaften zu lernen (vgl. Bell, Lederman und Abd-El-Khalick 2000). Ebenso wenig bedeutet es, dass diese Lehrkräfte im Unterricht *Nature-of-Science*-Inhalte in geeigneter Weise darstellen (vgl. Lederman 1999). Lederman (2007, vgl. S. 852) konstatiert, dass die Annahme, das *Nature-of-Science*-Verständnis von Lehrkräften beeinflusse das ihrer Schüler, bisher nicht empirisch belegt werden konnte. Das individuelle *Nature-of-Science*-Verständnis der Lehrkräfte ist also keines Falls hinreichend für den Lernerfolg der Schüler. Wohl aber erwächst eine besondere Relevanz adäquater Vorstellungen der Lehrenden zur Natur der Naturwissenschaften daraus, dass sie als Voraussetzung effektiver *Nature-of-Science*-Vermittlung im Schulunterricht betrachtet werden müssen. Abd-El-Khalick und Lederman (2000) folgern deswegen, dass das Verständnis der Lehrkräfte eine notwendige Bedingung gelingender Lehre zu *Nature of Science* sei (vgl. ebd., S. 2099).

Der zweite Bereich des Modells (pädagogisches Verständnis/Fähigkeiten) wird damit umso wesentlicher. Lehrende benötigen Kompetenzen, die ihnen helfen, produktive *Nature-of-Science*-Lernsituationen zu gestalten. Dabei ist es durchaus möglich, dass die konkrete Unterrichtsplanung und -durchführung wiederum vom Wissenschaftsverständnis der Lehrkräfte beeinflusst wird, wie eine Online-Studie von Schulze Heuling, Mikelskis-Seifert und Nückles (2019) nahelegt. Die Forschenden untersuchten 250 Physiklehrkräfte aus Deutschland sowie der Schweiz und Österreich. Eine Strukturgleichungsanalyse der Fragebogendaten deckte einen kausalen Zusammenhang zwischen bestimmten Wissenschaftsverständnissen der Lehrkräfte und ihren bevorzugten Methoden im Unterricht auf (vgl. ebd., S. 174). Somit kommt dem *Nature-of-Science*-Verständnis der Lehrkräfte insgesamt betrachtet eine hohe Bedeutung zu und es stellt sich die Frage, über welche *Nature-of-Science*-Vorstellungen Lehrkräfte im Allgemeinen, aber auch speziell im Kontext wissenschaftlicher Kontroversen verfügen.

In seinem Review kommt Lederman (2007, vgl. S. 852) zu dem Schluss, dass Lehrkräfte unabhängig vom eingesetzten Erhebungsinstrument häufig nicht über angemessene *Nature-of-Science*-Konzepte verfügen. An dieser Stelle sollen einige ausgewählte Studien den Befund Ledermans spezifizieren und ergänzen.

Abd-El-Khalick und BouJaoude (1997) untersuchten das *Nature-of-Science*-Verständnis von 20 Lehrerinnen im Alter zwischen 21 und 45 Jahren. In der nicht repräsentativen Studie wurden zusätzlich zu einer Version des *Views-on-Science-Technology-Society*-Fragebogens (*VOSTS*) noch Concept Maps und Interviews eingesetzt. Abd-El-Khalick und BouJaoude gelangten in der Auswertung der Daten zu der Einschätzung, dass die *Nature-of-Science*-Konzepte der Befragten verschiedene Mängel bzw. oftmals nur ein naives Verständnis aufweisen (ebd., S. 684). Nahezu alle Teilnehmerinnen sind scheinbar überzeugt, dass in der Wissenschaft eine ausgezeichnete Methode existiert, mit der wissenschaftliche Erkenntnisse erarbeitet werden und sind sich nicht der Vielfalt von Untersuchungsansätzen bewusst (vgl. ebd.). Der Großteil der Lehrerinnen zeigt wenig Einsicht darin, dass wissenschaftliche Forschung theoriegeleitet ist und Beobachtungen stets theoriegeladen sind (vgl. ebd., S. 685).

Interessant im Hinblick auf einen Zusammenhang zwischen dem Wissenschaftsverständnis von Lehrkräften und wissenschaftlichen Kontroversen ist eine Interviewstudie von Schulze Heuling, Mikelskis-Seifert und Nückles (2015). Analysiert wurden die Interviews von 36 Lehrkräften aus Deutschland und der Schweiz. Das dabei entwickelte Kategoriensystem erfasst vier verschiedene Wissenschaftsverständnisse (ebd., S. 46 f.):

- von Experimenten geleitetes Wissenschaftsverständnis
- von Modellen geleitetes Wissenschaftsverständnis
- von Autoritäten geleitetes Wissenschaftsverständnis
- von Diskursen geleitetes Wissenschaftsverständnis

Diese Wissenschaftsverständnisse sind idealtypisch, das heißt, das konkrete persönliche Wissenschaftsverständnis einer Lehrkraft entspricht einer Kombination bzw. Mischung dieser vier Verständnisbereiche. Das zuletzt genannte Wissenschaftsverständnis ist in Bezug auf wissenschaftliche Kontroversen besonders aufschlussreich. Die Forschenden beziehen dieses Wissenschaftsverständnis auf „die Entstehung und Entwicklung von Wissenschaft, die durch Ausdifferenzierung innerhalb und zwischen Diskursgemeinschaften entsteht" (ebd., S. 47). Die Kategorie umfasst dabei Diskurse innerhalb der wissenschaftlichen Gemeinschaft der Physiker, aber auch zwischen anderen gesellschaftlichen Gruppen, so dass Socio-Scientific Issues ebenfalls eingeschlossen sind. Dass sich Wissenschaft (als ausgeübte Tätigkeit von Wissenschaftlern) durch Diskurse auszeichnet, zeigt sich auch darin, dass diese bei der Entwicklung wissenschaftlicher Erkenntnisse eine wesentliche Rolle spielen. Als Konsequenz eines von Diskursen geleiteten Wissenschaftsverständnis einer Lehrkraft wird im Physikunterricht dargestellt, dass „Physik in ihrer Praxis und in ihren Erkenntnissen verhandelbar ist" (ebd. S. 48). Da dieser Aspekt im Umgang mit wissenschaftlichen Kontroversen im Schulunterricht essentiell ist, kann die Ausprägung des von Diskursen geleiteten Wissenschaftsverständnisses einer Physiklehrkraft entscheidend sein.

Im Kontrast zu Ledermans (2007) Bild eines mangelhaften Verständnisses der Lehrkräfte im Bereich von *Nature-of-Science* argumentieren Nott und Wellington (1996) weniger defizitorientiert. Sie ordnen Wissen und Konzepte von Lehrkräften über *Nature of Science* sowohl im fachdidaktischen Wissen (PCK) als auch im Fachwissen (CK) liegend ein (vgl. S. 247) und heben hervor, dass Lehrkräfte keine „inadäquaten" *Nature-of-Science*-Vorstellungen besitzen, sondern einfach eine Lehrerperspektive – geprägt durch ihre eigenen Erfahrungen – auf die Natur der Naturwissenschaften einnehmen:

> Teachers' knowledge about science is illustrated by examples from their own professional practice as much as scientific researchers' knowledge about the nature of science is illustrated by examples from their professional practice. Researcher-scientists know science through their professional practice and, we would argue, so do teachers. (Nott und Wellington 1998a, S. 308)

Zur Untersuchung der *Nature-of-Science*-Konzepte von Lehrkräften schlagen Nott und Wellington den Einsatz sogenannter „critical incidents" vor. Diese sollen die Lehrkräfte in eine Situation versetzen, die eine Erklärung wissenschaftlicher Denk- und Herangehensweisen beinhaltet und sie dazu bringt, über ihr weiteres Vorgehen in einem Unterrichtskontext zu entscheiden. Nott und Wellington sind überzeugt, die *Nature-of-Science*-Vorstellungen mit diesem Erhebungsverfahren besonders geeignet untersuchen zu können, da sie davon ausgehen, dass das Wissen von Lehrkräften über *Nature of Science* im Fach- und fachdidaktischen Wissen verortet ist und somit vor einem unterrichtsrelevanten Hintergrund beleuchtet werden müsse (vgl.

ebd., S. 297). Zur Veranschaulichung der Methode soll hier ein Beispiele eines solchen „critical incident“ genannt sein:

> You are conducting a lesson on the big bang theory of the origin of the universe. A year II pupil at the front interrupts in the middle of your account of the big bang and says, „My family believe that the Earth was created by God in six days. This is what it says in Genesis and we belive the Bible to be true.“
> List the kind of things you could say and do at this point. (Nott und Wellington 1998b, S. 583)

Im Beispiel werden Lehrkräfte zwar nicht mit einer wissenschaftlichen Kontroverse, aber mit einer kontroversen Problemstellung im Unterricht konfrontiert. In den Reaktionen der Lehrkräfte werden verschiedene *Nature-of-Science*-Aspekte thematisiert, wie die Vorläufigkeit wissenschaftlicher Erkenntnisse, deren empirische Fundierung sowie der epistemologische Status wissenschaftlicher Theorien (vgl. ebd., S. 588). Daraus wird ersichtlich, dass durchaus Potenzial in der Auseinandersetzung mit kontroversen Fragestellungen für das Explizieren von *Nature-of-Science*-Konzepten im naturwissenschaftlichen Unterricht liegen könnte.

Wenn sich Lehrkräfte mit wissenschaftlichen Kontroversen befassen, kann sich aber auch deren eigenes *Nature-of-Science*-Verständnis verändern. Zu diesem Ergebnis gelangt eine Studie von Niaz (2009), der 17 Chemielehrkräfte (Lateinamerika) im Kontext eines elfwöchigen Fortbildungskurses untersuchte. Gegenstand der Fortbildung waren historische Kontroversen in der Chemie, die allerdings vor allem physikalische Problemstellungen zur Entwicklung von Atommodellen beinhalteten (vgl. ebd., S. 51). Niaz formuliert als Ergebnis seiner Studie, dass das *Nature-of-Science*-Verständnis der Lehrkräfte durch die Auseinandersetzung, Diskussion und das Nachdenken über die wissenschaftlichen Kontroversen verbessert werden konnte (vgl. ebd., S. 60). Beispielsweise konnte eine Entwicklung der *Nature-of-Science*-Konzepte hinsichtlich der folgenden Aspekte beobachtet werden (vgl. ebd., S. 61):

- Vielfalt wissenschaftlicher Methoden
- Frage der Objektivität in der Wissenschaft
- Bedeutung empirischer Belege
- Bedeutung von Vermutungen bei der Erkenntnisgewinnung
- Bedeutung von Kontroversen bei der Erkenntnisgewinnung
- Kreativität der Wissenschaftler
- Unterscheidung zwischen Beobachtungen und naturwissenschaftlichen Gesetzen

Die Studie belegt, wie Lehrende selbst von der Beschäftigung mit wissenschaftlichen Kontroversen profitieren können, indem die individuellen *Nature-of-Science*-Konzepte herausgefordert werden und gegebenenfalls neu bewertet werden müssen. Selbstverständlich bleibt aber die Frage, inwiefern Lehrkräfte diese Entwicklung aus eigener Kraft bewältigen und ob sie das *Nature-of-Science*-Potenzial wissenschaftlicher Kontroversen auch von allein im Unterricht nutzen, offen.

Hinweise in diesem Zusammenhang liefern die Erkenntnisse von Dunlop und Veneu (2019), die in England halbstrukturierte Interviews mit 18 Lehrkräften der naturwissenschaftlichen Fächer durchführten. Anhand der gewonnenen Daten arbeiteten sie sogenannte „social representations" heraus, die Aufschluss über Vorstellungen und Werte der Lehrkräfte sowie deren Praxis zu wissenschaftlichen Kontroversen und deren Lehre geben sollen (vgl. ebd., S. 694). Dabei wurde deutlich, dass die befragten Lehrkräfte wissenschaftliche Kontroversen zwar als zentrales Element der Naturwissenschaften betrachten, aber deren Integration im Unterricht nicht die selbe Bedeutung beimessen. Die Lehrkräfte priorisieren, im Unterricht „die Fakten" zu vermitteln, was zeigt, dass der Vermittlung von *Nature of Science* im Zusammenhang mit wissenschaftlichen Kontroversen nicht automatisch eine Chance im Unterricht gegeben wird.

Zusammenfassend betrachtet, spielt vermutlich also auch das *Nature-of-Science*-Verständnis der Lehrkräfte eine Rolle im Umgang mit wissenschaftlichen Kontroversen. Aufgrund der obigen Ausführungen können dabei die folgenden Punkte hervorgehoben werden:

(a) Ein angemessenes *Nature-of-Science*-Verständnis der Lehrkräfte sowie Kompetenzen zur Darstellung von *Nature-of-Science*-Inhalten im Unterricht scheinen eine notwendige Voraussetzung gelingender Lerngelegenheiten im Bereich von *Nature of Science* zu sein.

(b) Das *Nature-of-Science*-Verständnis von Lehrkräften weist oftmals Defizite auf.

(c) Bei der Auseinandersetzung mit (wissenschaftlichen) Kontroversen können *Nature-of-Science*-Aspekte von Lehrkräften thematisiert und reflektiert werden.

Diese drei Punkte illustrieren, wie die Realisierung des Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen im Bereich von *Nature-of-Science* maßgeblich durch die jeweilige Lehrkraft bestimmt sein wird. Konkret bleibt dabei aber noch offen, inwieweit genau Physiklehrkräfte dazu in der Lage sind, das *Nature-of-Science*-Potenzial wissenschaftlicher Kontroversen im Unterricht nutzen zu können. Zur Untersuchung dessen soll Teil II (Empirischer Teil) dieser Arbeit einen Beitrag leisten.

2.4 Der Umgang mit wissenschaftlichen Kontroversen im Unterricht

2.4.1 Prinzipien und Aspekte eines Unterrichts mit wissenschaftlichen Kontroversen

An dieser Stelle soll beleuchtet werden, welche Herausforderungen bei der Gestaltung des Unterrichts zu bzw. mit kontroversen Themen bestehen, wie Lehrkräfte diesen begegnen können und welche unterrichtlichen Prinzipien der Kontroversität generell zuträglich sind. Da die Nutzung des Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen von der Gestaltung des Unterrichts abhängig sein wird und damit erheblich durch die jeweilige Lehrkraft bestimmt ist, lautet die Fragestellung dieses Kapitels: *Wie sollen Lehrkräfte mit wissenschaftlichen Kontroversen im Unterricht umgehen?* Zur Beantwortung dieser Frage können für wissenschaftliche Kontroversen adaptierbare Hinweise auch aus der Literatur zu Socio-Scientific Issues oder allgemein zu gesellschaftlich relevanten Kontroversen herangezogen werden. Da in diesen Bereichen vielfältige Vorschläge ausgearbeitet wurden, während konkret für wissenschaftliche Kontroversen kaum Gestaltungsprinzipien aus dem Literaturstudium gewonnen werden können, bietet sich hier eine sinnvolle Quelle, um Antworten auf die Leitfrage dieses Kapitels zu erhalten.

Wie Unterricht speziell an die Ansprüche und das Bildungspotenzial wissenschaftlicher Kontroversen angepasst gestaltet werden sollte, kann nicht unabhängig von zuvor definierten Unterrichtszielen gedacht werden. Die im Kapitel 2.2 (ab S. 34) beschriebenen Elemente des Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen werden im Sinne einer solchen Zielperspektive für den naturwissenschaftlichen Unterricht im Folgenden zugrunde gelegt. Damit können Erkenntnisgewinnungskompetenz (insbesondere *Nature of Science*) sowie Kommunikationskompetenz als Unterrichtsschwerpunkte angesehen werden, die laut Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife auch Aspekte innerfachlichen Bewertens (vgl. KMK 2020, S. 17) enthalten. Da Höttecke und Mrochen (2010, vgl. S. 26) für den Physikunterricht festhalten, der Kompetenzbereich Bewerten der Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss ziele vor allem auf innerfachliches Bewerten ab, werden dementsprechend auch fachdidaktische Erwägungen in Bezug auf diesen Kompetenzbereich einbezogen. Insgesamt stellt sich damit die Frage danach, welche Unterrichtsmaßnahmen Kontroversität abbilden und besonders die Entwicklung von Kommunikations- sowie Erkenntnisgewinnungskompetenz bzw. ein adäquates *Nature-of-Science*-Verständnis unterstützen.

Levinson (2006, vgl. S. 1202) geht davon aus, dass keine Einigkeit im Hinblick auf geeignete Vermittlungsstrategien für kontroverse Problemstellungen im Unterricht besteht und auch Oulton et al. (2004, S. 489) heben hervor, dass „the principles and methods relating to the teaching of controversial issues are themselves controversial“. Beispielsweise sei fragwürdig, inwieweit Lehrkräfte einen neutralen Standpunkt einnehmen sollten und ob eine möglichst ausgeglichene Darstellung der unterschiedlichen gegensätzlichen Positionen zielführend ist (ebd., S. 491). Mögliche Schwierigkeiten und damit auch didaktische Diskussionspunkte lassen sich nach Kerr et al. (2015) insgesamt den folgenden Problemfeldern zuordnen:

- *Unterrichtsstil*: Hierbei stellt sich die Frage, wie mit der eigenen Positionierung der Lehrkraft während des Unterrichtens umgegangen werden soll („Gefahr der Voreingenommenheit") und ob Lehrende Neutralität wahren müssen, eine Balance zwischen den verschieden Standpunkten herstellen sollten und inwiefern sie die Meinungen der Schüler hinterfragen oder stützen, um unterschiedliche Argumente abzubilden (vgl. ebd., S. 16 f.).

- *Berücksichtigung von Empfindungen der Schüler*: Eine weitreichende Sensibilität für mögliche negative Gefühle, wie sie von Kerr et al. (2015, vgl. S. 17) bei der Thematisierung kontroverser Fragestellungen im Unterricht betrachtet wird, dürfte in der Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Themen eine untergeordnete Rolle spielen. Da wissenschaftliche Kontroversen seltener Wertefragen oder persönliche Anschauungen betreffen, kann dieser Aspekt als marginal betrachtet werden. Dennoch ist es zumindest rein prinzipiell möglich, dass Aussagen in Diskussionen zu persönlich ausgelegt werden oder zu emotionalen Äußerungen führen.

- *Unterrichtsatmosphäre und Kontrolle*: Darunter fällt die Befürchtung, Diskussionen könnten eskalieren, so dass die Lehrkraft teilweise die Kontrolle über das Unterrichtsgeschehen verliert, wodurch ihre Autorität leidet (vgl. ebd.). Auch dieser Punkt dürfte im Zusammenhang mit wissenschaftlichen Kontroversen nur wenig bedeutsam sein, da eine hohe Emotionalität zu einem fachwissenschaftlichen Sachverhalt nicht unbedingt zu erwarten ist.

- *ausreichendes Fachwissen*: Kontroversen können einen hohen Grad an Komplexität aufweisen und fachlich anspruchsvoll sein. Dies erfordert ausreichendes Vorwissen der Lehrkraft zum Thema und unter Umständen eine regelmäßige Aktualisierung des Kenntnisstandes (vgl. ebd., S. 18).

- *Reaktion auf spontane Fragen oder Äußerungen*: Die Äußerungen und Nachfragen von Schülern sind mitunter schwer kalkulierbar, so dass mit Unwägbarkeiten im Unterricht umgegangen werden muss. Lehrkräfte können nicht auf alle Fragen vorbereitet sein (vgl. ebd.).

Trotz der Einschätzung, dass einfache oder allgemein akzeptierte bzw. gültige Lösungen zu diesen Punkten nicht existieren (vgl. ebd.), geben Kerr et al. eine Reihe von Hinweisen an, wie den oben genannten Problemfeldern begegnet werden könnte: Zunächst müssten Lehrkräfte reflektieren, welche eigenen Überzeugungen und Erfahrungen im Zusammenhang mit der kontroversen Fragestellung Einfluss auf den Unterricht nehmen könnten. Um diesen auch zielführend gestalten zu können, sollten Lehrkräfte ein Bewusstsein für die Natur von Kontroversen allgemein, aber auch der damit verbundenen Schwierigkeiten im Unterricht entwickeln (vgl. ebd., S. 19). Für die konkrete Umsetzung sei weiterhin wichtig, dass Lehrkräfte über ein Repertoire verschiedener Unterrichtsansätze bzw. -methoden verfügen und deren Vor- und Nachteile kennen (vgl. ebd., S. 20 ff.). Daneben stellen Kerr et al. die Bedeutung einer wertschätzenden, offenen, demokratischen Lernatmosphäre heraus, welche durch die Vereinbarung von Regeln für Diskussionen und zum Umgang mit Meinungsvielfalt getragen wird (vgl.

ebd., S. 20). Dazu gehört auch, dass Lehrkräfte Schülern eine „analytische Vorgehensweise, die erforderlich ist, um kontroverse Themen zu erörtern“ (ebd.), vermitteln, sodass Schüler über Konzepte zur Auseinandersetzung mit Uneinigkeit verfügen. Auch die Rolle der Lehrkraft an sich ist entscheidend. Statt sich selbst als Experten zu betrachten, müssten Lehrkräfte vielmehr Moderatoren problemorientierten Unterrichts sein und Schüler bei der Informationssuche unterstützten oder sie zum diskutieren motivieren (vgl. ebd., S. 21). Daraus folgt, dass Lehrkräfte über Wissen und Fähigkeiten „für das Planen und Leiten von Diskussionen“ (ebd.) verfügen sollten. Zusätzlich beschreiben Kerr et al., wie Unterricht Schüler für einen kritischen Blick auf vorgefundene Informationen sensibilisieren solle, um auch einseitige, unsachliche, subjektiv geprägte oder tendenziöse Quellen angemessen beurteilen zu können (vgl. ebd.). Abschließend ziehen die Autoren die Möglichkeit in Erwägung, das mehrere Lehrkräfte mit den Schülern gemeinsam an einem kontroversen Thema arbeiten oder auch externe Experten eingeladen werden (vgl. ebd., S. 22)

Auch Oulton, Dillon und Grace (2004) formulieren spezielle pädagogische bzw. didaktische Ansprüche an einen Unterricht zu kontroversen Themen. Die von ihnen genannten sechs Aspekte weisen dabei starke Parallelen zu den Vorschlägen von Kerr et al. (2015, siehe oben) auf:

- Konzentration auf die Natur von Kontroversen: z. B. besitzen verschiedene Menschen verschiedene Meinungen, verschiedene Anschauungen und wissenschaftliche Erkenntnisse haben Grenzen
- Lernende sollten dafür sensibilisiert werden, dass Anschauungen oder unterschiedliche grundlegende Annahmen die Positionen von Menschen beeinflussen.
- kritische Reflexion der eigenen Position (sowohl der Schüler als auch der Lehrkräfte), um vorurteilsbehafteten Bewertungen vorzubeugen
- Schülern sollte vermittelt werden, Voreingenommenheit zu erkennen, aber auch kritisch gegenüber Aussagen oder Positionen zu sein, die für sich selbst Neutralität, Unvoreingenommenheit oder eine ausgeglichene Sicht in Anspruch nehmen.
- Offenheit gegenüber anderen Meinungen und der Änderung des eigenen Standpunktes, ohne sich zu früh für eine Position festzulegen sowie die Anregung zu einer breiten Informationsrecherche
- Lehrkräfte sollten ihre persönliche Meinung gegenüber den Schülern kommunizieren und dabei erläutern, warum sie eine bestimmte Position vertreten.
  (vgl. Oulton, Dillon und Grace 2004, S. 420)

Die Vorschläge von Kerr et al. (2015) und Oulton, Dillon und Grace (2004) zum Umgang mit kontroversen Problemstellungen im Unterricht weisen durchaus Gemeinsamkeiten auf. Dabei fokussieren sie insgesamt betrachtet auf die Analyse und das Verständnis verschiedener Positionen (Multiperspektivität), auf eine kritische, hinterfragende und reflektierte Auseinandersetzung mit Informationen und deren Quellen, auf Selbstreflexion und die Organisation

von Diskussionen sowie ein Grundverständnis für das Wesen einer Kontroverse im Allgemeinen. Ganz ähnliche Gesichtspunkte finden sich auch bei Ohl (2013), die für die Didaktik der Geografie die folgenden „Prinzipien im Umgang mit Komplexität und Kontroversität" (ebd., S. 6) nennt:

- Kontroversitätsprinzip
- Vielperspektivität/Perspektivenwechsel
- Training von Argumentationsfähigkeiten
- Unsicheres Wissen explizit machen
- Wissenschaftsorientierung/Quellenbewusstsein
- Anwendung reduktiv-organisierender Strategien
- Training von Systemkompetenz/vernetztem Denken
- werteorientierter Geografieunterricht, ethische Urteilskompetenz (ebd.)

Die vorletzten beiden Punkte dienen vor allem der Begegnung mit Komplexität im Unterricht und betreffen nicht zwangsläufig die Kontroversität eines Themas. Werte und ethische Urteile sind im Bereich wissenschaftlicher Kontroversen nur randständig von Interesse. Wohl aber erscheinen für wissenschaftliche Kontroversen insbesondere die ersten fünf Prinzipien bedeutsam. Mit dem Kontroversitätsprinzip bezieht sich Ohl auf ein Grundprinzip der politischen Bildung. Im Perspektivenwechsel bzw. der Darstellung unterschiedlicher Perspektiven sieht Ohl eine Möglichkeit, dem Kontroversitätsprinzip gerecht werden zu können, indem die Gründe verschiedener Positionen verstanden werden sollen und die Berechtigung vieler unterschiedlicher Standpunkte nachvollzogen werden kann (vgl. ebd., S. 7 f.). Für die Förderung der Argumentationskompetenz schlägt Ohl beispielsweise angeleitete Diskussionen vor (vgl. ebd., S. 8). Ohl begründet das Prinzip unsicheres Wissen zu Explizieren damit, dass „Der beste Umgang mit mangelnden Gewissheiten deren Offenlegung [ist]" (ebd.; Umstellung des Verfassers) und es Lehrkräften nicht immer möglich sein wird,

> [...] eine „richtige" Lösung zu erarbeiten und zu sichern. Vielmehr geht es darum, wichtige Argumente festzuhalten und zu verdeutlichen, welche Informationen fehlen und welche Widersprüche die aktuelle fachliche Diskussion kennzeichnen. (ebd.)

Wissenschaftsorientierung und Quellenbewusstsein, verstehen sich analog zur kritischen Auseinandersetzung mit Informationen und der Verwendung vertrauenswürdiger Quellen, wie sie auch Kerr et al. (2015, vgl. S. 21) hervorheben.

Sowohl die Aspekte zum Umgang mit Kontroversen im Unterricht, wie sie von Kerr et al. (2015) sowie Oulton, Dillon und Grace (2004) genannt werden als auch die Unterrichtsprinzipien nach Ohl (2013) weisen deutliche Schnittmengen auf. Davon sollen die folgenden Gesichtspunkte für den Umgang mit kontroversen Themen im Unterricht nachstehend noch genauer erläutert werden:

(1) Kontroversitätsprinzip und Multiperspektivität

(2) Diskutieren und Argumentieren

(3) Informationsklarheit gewinnen

(4) kritische Haltung

Zusätzlich erscheinen, wie noch begründet werden wird, die beiden Punkte

(5) Bewertungsstrukturwissen

(6) *Nature of Science* thematisieren

bedeutungsvoll für einen Unterricht zu und mit wissenschaftlichen Kontroversen.

(1) Kontroversitätsprinzip und Multiperspektivität

Das Kontroversitätsprinzip (siehe auch Kapitel 2.2), welches seinen Ursprung in der politischen Bildung hat, steht nicht nur in engem Zusammenhang damit, dass Lehrkräfte ihre Schüler nicht mit ihrer eigenen Meinung „überwältigen“ (Überwältigungsverbot) dürfen, sondern auch mit Multiperspektivität im Unterricht. Ein Unterricht, der das Kontroversitätsprinzip berücksichtigt, muss einen multiperspektivischen Zugang ermöglichen, indem eine Problemstellung aus verschiedenen Perspektiven heraus betrachtet wird, Schüler verschiedene Standpunkte wertschätzen lernen und unterschiedliche Positionen prinzipiell willkommen sind (vgl. Manzel 2017, S. 32 f.).

Die Aufgeschlossenheit der Lernenden gegenüber anderen, unterschiedlichen Positionen betrachtet auch Hedtke (2002, vgl. S. 7) als Imperativ eines kontroversitätsorientierten Unterrichts. Lernenden sollte in diesem Sinne eine Haltung der „open mindedness“ (vgl. Oulton, Dillon und Grace 2004, S. 420) vermittelt werden, um den offenen Austausch zu verschiedenen Standpunkten nach den Prinzipien freier Meinungsäußerung (vgl. Niendorf und Reitz 2019, S. 4) zu unterstützen. Unterricht müsse nach Kerr et al. (2015, S. 11) insgesamt einen „offenen und gemeinschaftlichen Ansatz“ verfolgen und auch Heitmann und Tiemann (2011, vgl. S. 132) empfehlen bei der Bewertung von Sachverhalten, dass Lehrkräfte offen für unterschiedliche Vorschläge und Einschätzungen sein sollten, ohne diese einfach als „richtig“ oder „falsch“ einordnen zu wollen.

Gleichwohl Kontroversität nicht unbedingt vollumfänglich abgebildet werden müsse, um dennoch grundsätzlich vermittelt werden zu können (vgl. Hedtke 2002, S. 2), ist die Darstellung mehrerer Perspektiven unabdingbar bei der Behandlung kontroverser Themen (vgl. Oulton et al. 2004, S. 491). Cross und Price (1996, vgl. S. 330) fordern in diesem Zusammenhang, dass Multiperspektivität nicht als mitunter stark vereinfachte bipolare Diskussion zum Pro und Kontra einer Problemstellung ausgelegt wird, sondern tatsächlich die verschiedensten Gesichtspunkte einer kontroversen Frage vielseitig und aus unterschiedlichen Perspektiven heraus betrachtet werden. Darüber hinaus kann Multiperspektivität im Unterricht dazu beitragen, dass Schüler ein allgemeines Verständnis für Kontroversität entwickeln können (vgl. Kerr et al. 2015, S. 23). So gehen auch Oulton, Dillon und Grace (2004, vgl. S. 415) davon aus, dass

Lernende verstehen müssen, warum unterschiedliche Postionen zu einer Frage vorliegen. Dabei sollten Lehrkräfte ihre Schüler motivieren, die verschiedenen Standpunkte zu analysieren und kritisch zu reflektieren. Allein die Darstellung verschiedener Positionen ist hierfür nicht ausreichend (vgl. Stradling 1984, S. 403 f.). Eine solche Auseinandersetzung mit verschiedene Perspektiven halten auch Rafolt, Kapelari und Kremer (2019, vgl. S. 6) in Verbindung mit der Fähigkeit von Schülern, kritisch zu denken, für essentiell. Schüler müssten demnach auch Kompetenzen zur Selbstregulation trainieren, sich „von ihrem System an Emotionen, Haltungen, Überzeugungen sowie Wissensformen und -beständen distanzieren, um neue Perspektiven einnehmen zu können“ (ebd.).

Eine wichtige Frage bei der Umsetzung von Multiperspektivität im Unterricht ist für Lehrkräfte, inwiefern die unterschiedlichen Positionen ausgewogen dargeboten werden sollten und sie selbst eine neutrale Position einnehmen müssten, ohne ihre eigene Meinung zu offenbaren. Die Idee der ausgewogenen, neutralen Darstellung einer Kontroverse im Unterricht lässt sich auf den Gedanken zurückführen, dass eine unangemessene Beeinflussung der Schüler zugunsten einer bestimmten Position vermieden werden sollte. Fragwürdig dabei ist allerdings zum einen, ob Lehrkräften eine solche Objektivität überhaupt möglich ist und was Neutralität wirklich bedeutet. Stradling (1984, vgl. S. 125 f.) argumentiert, dass jede Auswahl von Lerninhalten nur subjektiv sein kann und abhängig davon ist, was eine Lehrkraft für korrekt und wichtig erachtet. Oulton, Dillon und Grace (2004, vgl. S. 417) stellen ebenfalls fest, dass der Einsatz von Unterrichtsmaterialien sowie die Gestaltung von Unterricht nicht vollkommen vorurteilsfrei oder objektiv sein kann. Darum sei es, so Oulton, Dillon und Grace, zielführender, dass Lehrkräfte über die persönlichen Überzeugungen und Überlegungen aufklären und einen eigenen Standpunkt im Schulunterricht vertreten. Dies gebe den Lernenden Gelegenheit, die Darstellungen der Lehrkraft besser einordnen zu können und kritisch zu reflektieren.

Eine solche Berücksichtigung der Subjektivität der Lehrkraft erscheint realistischer als die Annahme wirklicher Neutralität, impliziert aber auch, dass Lehrende ihr Position transparent darlegen. Dabei sollte den Lernenden verdeutlicht werden, aus welchen Gründen die jeweilige Position gewählt wurde und dass diese lediglich ein möglicher Standpunkt unter Vielen ist, die sich ebenfalls in den Unterrichtsinhalten wiederfinden (vgl. Asimeng-Boahene 2007, S. 240). Auch ein Hinweis auf die Grenzen bzw. mögliche Kritikpunkte in Bezug auf die Position der Lehrkraft kann Schülern dabei helfen, den vom Lehrenden konzipierten Unterricht und dessen Aussagen besser beurteilen zu können.

Spätestens, wenn es Ziel des Unterrichts sein soll, dass Schüler sich konkret positionieren, erscheint es wenig kohärent, dass der Lehrende demgegenüber keinen eigenen Standpunkt vertritt. Dadurch, dass Lehrkräfte ihre persönliche Meinung selbst zurückhalten, kann Schülern schwerlich die Idee offenen Meinungsaustauschs demonstriert werden. Auch die Animation der Lernenden zur Offenlegung ihrer Positionen könnte dadurch gehemmt werden (vgl. Oulton, Dillon und Grace 2004, S. 417). Lehrkräfte selbst beschreiben die Befürchtung, eine ausschließlich neutrale Haltung könnte die eigene Glaubwürdigkeit unterminieren, wodurch die Lehrer-Schüler-Beziehung leiden könnte (vgl. Stradling 1984, S. 126).

Ein weiteres Argument, dass den Anspruch einer gleichwertigen, ausbalancierten Abbildung verschiedener Positionen im Unterricht in Frage stellt, wird von Scott, Richards und Martin (1990) vorgebracht, die für sozialwissenschaftliche Untersuchungen kontroverser Themen folgendes Problem beschreiben:

> […] an epistemologically symmetrical analysis of a controversy is almost always more useful to the side with less scientific credibility or cognitive authority. In other words, epistemological symmetry often leads to social asymmetry or nonneutrality. (ebd., S. 490)

Übertragen auf den Schulunterricht bedeutet dies: Eine gleichrangige Darstellung der verschiedenen Positionen einer Kontroverse wird häufig nicht dem Vorkommen und der Bedeutung dieser Positionen in der Wirklichkeit entsprechen. Der Versuch einer ausgewogenen, neutralen Behandlung kann somit sogar Ursache einer Verzerrung sein. Dies führt dann im Gegenteil zu „Nicht-Neutralität“, wenn eine Position übermäßig betont wird, die eigentlich weniger Relevanz besitzt, während eine andere Position verkürzt wird oder die für sie sprechenden Belege und Argumente nur teilweise ausgeführt werden. Generell stellt sich die Frage, was unter Neutralität bzw. Ausgewogenheit verstanden werden kann. Ist es dafür notwendig, dass die Anzahl der für die einzelnen Positionen vorgebrachten Argumente übereinstimmt oder müsste dabei eine Gewichtung entsprechend der Bedeutung oder Fundierung dieser Argumente berücksichtigt werden?

Zusammenfassend betrachtet müssen die Neutralität einer objektiv agierenden Lehrkraft und eine unabhängige, ausbalancierte Auseinandersetzung im Unterricht wahrscheinlich als Illusion eingestuft werden. Dennoch sollten sich Physiklehrkräfte ihrer besonderen fachlichen Autorität, ihrer Expertenstellung gegenüber den Schülern und dem damit verbundenen Gewicht der eigenen fachlichen Position sowie des daraus resultierenden Einflusses auf die Lernenden bewusst sein. Darum müssen sich Lehrkräfte nicht nur bemühen, unterschiedliche Positionen multiperspektivisch im Unterricht darzulegen, sondern auch das jeweilige Für und Wider kritisch zu analysieren. Ein geeignetes Mittel dazu könnten entsprechende Diskussionen im Fachunterricht sein.

(2) Diskutieren und Argumentieren

Kontroversität lässt sich im Unterricht in geeigneter Form durch Diskussionen abbilden (vgl. Levinson 2006, S. 1213; Stradling 1984, S. 128). Damit einher gehen Lerngelegenheiten zur Förderung des Argumentierens oder allgemein der Kommunikationskompetenz der Lernenden, wie bereits in Kapitel 2.2 skizziert wurde. Sowohl Archila, Molina und Mejía (2020, vgl. S. 650) als auch Justi und Mendonca (2016, vgl. S. 799) sehen beispielsweise in der Thematisierung historischer Kontroversen in der Wissenschaft eine Gelegenheit Argumentationsfähigkeiten zu fördern. Eine notwendige Voraussetzung gelingenden Diskutierens im Unterricht ist allerdings auch ein dementsprechendes Unterrichtsklima des Zuhörens sowie der Offenheit und Akzeptanz gegenüber anderen Meinungen (vgl. Stradling 1984, S. 128; Kerr et al. 2015, S. 12).

Aufschnaiter und Prechtl (2018) beschreiben als Zielstellung des kontroversen Argumentierens im naturwissenschaftlichen Unterricht,

> […] dass in einem *inhaltsbezogenen Diskurs* miteinander ausgehandelt wird, warum eine bestimmte Behauptung Gültigkeit hat, aber auch, was die Gültigkeit einer Behauptung möglicherweise einschränkt und welche alternativen Behauptungen aufgestellt werden können [Hervorhebung im Original]. (ebd., S. 87 f.)

Dazu sollten Lehrkräfte die Aussagen ihrer Schüler hinterfragen und stets Begründungen verlangen, aber auch ausreichendes Vorwissen zu den Fachinhalten der Diskussion sichern, da dieses eine wichtige Grundlage im Argumentationsprozess ist (vgl. ebd., S. 89). Daneben können Lehrkräfte auch helfen, sprachliche Kompetenzen auszubilden, da das Niveau und der Erfolg einer Diskussion dadurch bestimmt werden könnte, inwieweit die Schüler dazu in der Lage sind, gültige Argumente klar und nachvollziehbar mitzuteilen sowie sich in Diskussionen sachorientiert und gut verständlich auszudrücken (vgl. Kerr et al. 2015, S. 13). Die damit verbundene Kommunikationskompetenz der Lernenden bemisst sich schließlich nach der „*sachgerechten* und *adressatengerechten* Auswahl von *Sachinformation*, *Veranschaulichungsmittel*, *Kontext* und *Sprachebene* zur Darstellung eines bestimmten Sachverhaltes [Hervorhebung im Original]“ (Kulgemeyer 2010, S. 10). Vergleichbare Empfehlungen gibt Kraus (2008), der sich im Bereich des Erörterns bzw. Argumentierens an der Didaktik für den Deutschunterricht orientiert und die folgenden vier Aspekte darlegt:

- Unterscheidung von Behauptung und Begründung;
- Angabe von Gründen, d. h. Fakten, Grundsätze, Beispiele, Erläuterungen;
- Wertung und Gewichtung von einzelnen Argumenten;
- sprachliche Darstellung logischer Zusammenhänge, beispielsweise, wann welche Konjunktion angemessen ist. (ebd., S. 9)

Da die Diskussion fachlicher Inhalte auch die Bewertung von Aussagen oder Argumenten einschließt, kann eine Anlehnung an Prinzipien zur Förderung von Bewertungskompetenz günstig sein. Heitmann und Tiemann (2011, vgl. S. 132) raten beispielsweise dazu, Aussagen unter verschiedenen Perspektiven zu betrachten (Multiperspektivität) und die Bewertungen bzw. Urteile der Schüler auch zu reflektieren, so dass die verwendeten Bewertungskriterien analysiert werden können und die Gültigkeit von Argumentationen eruiert werden kann. Kriterien einer solchen Reflexion könnten beispielsweise sein, inwieweit Belege zur Stützung der Argumente vorliegen, ob sich die Argumente mit übergeordneten Prinzipien vereinbaren lassen und auch spezielle Fälle abdecken, inwiefern möglichst unterschiedliche Perspektiven berücksichtigt wurden und ob eine logisch stringente Argumentationsstruktur besteht, in der die unterschiedliche Relevanz verschiedener Teilargumente mit eingeht (vgl. Sieve und Schanze 2012, S. 375).

Eine grundlegende Frage im Kontext von Diskussionen im Unterricht ist, ob Schüler dazu angeregt werden sollten, sich zu positionieren und sich für einen bestimmten Standpunkt zu entscheiden. Oulton, Dillon und Grace (2004, vgl. S. 418) sehen dies kritisch, weil eine zu frühe Meinungsbildung - vor allem bei besonders komplexen Fragestellungen - erstens Gefahr läuft, wenig fundiert und nicht tiefgründig genug zu sein. Zweitens sei zweifelhaft, inwiefern Schülern eine Positionierung abverlangt werden könne, wenn auch unter Fachexperten keine einheitliche unstrittige Meinung gefunden werden kann. Gerade bei stark fachlich ausgerichteten Fragestellung ist dies einerseits enorm anspruchsvoll, andererseits aber kaum persönlich relevant für die Schüler. Darum halten Oulton, Dillon und Grace fest, dass nicht entscheidend sei, sich selbst zu positionieren, sondern Fähigkeiten für den Prozess des Argumentierens und

Diskutierens im Vordergrund des Unterrichtens stehen sollten. Zu dieser Einschätzung kommt auch Allchin (2012). Aufgrund der Prämisse, dass Schüler im naturwissenschaftlichen Unterricht lernen sollten, die Verlässlichkeit bzw. Glaubwürdigkeit von (wissenschaftlichen) Aussagen einschätzen zu können, geht er davon aus, dass die Durchführung einer „well-informed analysis“ der Aussagen und Ansätze wichtiger sei, als die Ausarbeitung einer eigenen Position (vgl. ebd., S. 696). Das bedeutet selbstverständlich nicht, dass Schüler keinen eigenen Standpunkt entwickeln dürften, wohl aber, dass Lehrkräfte dies nicht verbindlich einfordern sollten.

(3) Informationsklarheit gewinnen

Die Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Kontroversen erfordert auch, dass Schüler sich ein fachliches Urteil bilden können. Höttecke (2013, vgl. S. 8), der sich bei der Konzeption von Bewertungskompetenz allgemein anhand eines Modells für Entscheidungsprozesse nach Betsch, Funke und Plessner (2011) ausrichtet, verweist auf das Klären von Informationen vor der Entscheidungsfindung (präselektionale Phase). Hierzu wird das Recherchieren von Informationen gezählt, aber auch die Beurteilung der Informationslage an sich. Werden beispielsweise zusätzliche Informationen benötigt, um zu einer Bewertung gelangen zu können? Auch Eggert und Bögeholz (2006) berücksichtigen in ihrem *Göttinger Modell der Bewertungskompetenz* das „Generieren und Reflektieren von Sachinformationen“ (ebd. S. 189 f.). Darunter fällt neben der Planung und Umsetzung der Informationsrecherche auch die Aufarbeitung der gefundenen Informationen zur Erfassung der unterschiedlichen möglichen Positionen (vgl. ebd.). Dabei können Schüler im Rahmen des Zusammentragens von Informationen zu einer kontroversen Problemstellung lernen, Belege (Evidenz) für die verschiedenen Positionen zu ermitteln und diese auch zu beurteilen (vgl. Cross und Price 1996, S. 329). Andererseits ist es wesentlich, dass herausgefunden und kommuniziert wird, welche Informationen ungewiss, ungenau oder unerforscht sind und somit fehlen, um Klarheit über die Daten- bzw. Informationslage insgesamt gewinnen zu können (vgl. Ohl 2013, S. 8).

Zum Umgang mit Informationen gehört auch ein Bewusstsein für die herangezogenen Quellen. Diese sollen entsprechend den Bildungsstandards für die Allgemeine Hochschulreife „hinsichtlich der Kriterien Korrektheit, Fachsprache und Relevanz für den untersuchten Sachverhalt“ (KMK 2020, S. 16 (K2)) beurteilt werden. Da Schüler nicht über die Erfahrungen und Kenntnisse von Wissenschaftlern bei der Bewertung wissenschaftlicher Fachinformationen verfügen, ergeben sich durchaus Herausforderungen bei der Reflexion von Quellen im Schulkontext. Gebhard, Höttecke und Rehm (2017, S. 90) nennen als Grundlage für Nicht-Experten diesbezüglich die folgenden Kriterien zur Einschätzung von Informationsquellen:

- Verfügen über Forschungsmittel und weitere Ressourcen, z. B. indem Projekte öffentlich gefördert werden (z. B. BMBF, DFG, namhafte Stiftungen)

- Publikationen in bedeutenden wissenschaftlichen Journalen oder Handbüchern die Peer-Review zur Absicherung der Forschungsgüte einsetzen

- Anerkenntnis der Expertise durch weitere Wissenschaftler/innen, was sich z. B. durch eingeladene Vorträge oder Einladungen zu Forschungsaufenthalten zeigt

- häufiges Zitieren durch andere Wissenschaftler/innen

- Einladungen als Plenarreferent wissenschaftlicher Tagungen und Empfang von Preisen und Auszeichnungen von Fachgesellschaften mit wissenschaftlichem Hintergrund
- guter Ruf innerhalb der Wissenschaftlergemeinschaft und darüber hinaus
- erfolgreiche Zertifizierung über Diplome und Promotionen an öffentlichen Hochschulen

Diese Gesichtspunkte müssten je nach Altersstufe der Lernenden adressatengerecht ausformuliert, ausgewählt und gegebenenfalls vereinfacht werden. Einen analogen Ansatz verfolgt auch Wodzinski (2013). Dazu erstellte sie eine Liste mit Bewertungskriterien für Quellen im Internet, um Schüler bei der Einschätzung der Glaubwürdigkeit dieser Informationsquellen zu unterstützen. Als Kriterien werden dabei zum Beispiel Angaben zum Autor, zur Aktualisierung und Gestaltungsform des Internetauftritts, aber auch zur inhaltlichen Korrektheit und den Referenzen der Internetseite verwendet (vgl. ebd., S. 14). Solche Kriterien können auch dabei helfen unterschiedliche Quellen miteinander zu vergleichen, um abzuwägen, welche Informationen relevant und vertrauenswürdig sind. Auf der anderen Seite kann eine Gegenüberstellung unterschiedlicher Informationen dazu dienen, deren Quellen und die möglicherweise zugrundeliegenden Interessen besser einzuschätzen (vgl. Eilks, Marks und Burmeister 2012, S. 365). Ein kompetenter und quellensensibler Umgang mit vorgefundenen Informationen sollte in jedem Fall einschließen, unterschiedliche Informationsquellen zu konsultieren, um Aussagen abgleichen, bestätigen oder hinterfragen zu können.

(4) kritische Haltung

Kritisches Hinterfragen wird als eine unerlässliche Komponente im Umgang mit kontroversen Themen angesehen (vgl. Kerr et al. 2015, S. 13). Schüler zu einer kritischen Auseinandersetzung mit Aussagen und Informationen zu befähigen, betrachtet Heinicke (2014, vgl. S. 31) im Zuge kompetenten Bewertens auch prinzipiell als Auftrag des naturwissenschaftlichen Unterrichts. Stradling (1984, vgl. S. 128) würde sogar den Erfolg einer Unterrichtseinheit zu einer kontroversen Fragestellung daran messen, inwieweit die Schüler gelernt haben, Aussagen und Positionen in Frage zu stellen. Als Möglichkeit eine solche Haltung zu schulen, kommen neben der Vorbildwirkung der Lehrkraft vor allem gezielte Aufgaben im Unterricht in Frage. Beispielsweise geben Oulton, Dillon und Grace (2004) zwölf Untersuchungsfragen an, die Schüler bei Ihrer Informationsrecherche leiten sollen. Dazu gehören unter anderem Fragestellungen, wie:

- Wer sind die beteiligten Akteure?
- Welche Interessen vertreten sie und welche Ziele wollen sie erreichen?
- Gibt es finanzielle Abhängigkeiten?
- Welche Belege bzw. Nachweise werden angegeben?
- Werden die Grenzen der Evidenz, auf die sich berufen wird, diskutiert?
- Werden mögliche Gegenargumente einbezogen?

Insbesondere die letzten drei exemplarisch genannten Fragen spielen eine wichtige Rolle bei der Analyse wissenschaftlicher Kontroversen. Darüber hinaus kann die Initiierung einer reflektierenden, kritischen Denkweise auch in Diskussionsformaten im Unterricht gelingen. Ziel sollte es insgesamt sein, Lernenden eine kritische Haltung gegenüber den Aussagen, Argumenten, den angegebenen Belegen bzw. der Evidenz und den jeweiligen Quellen näher zu bringen, so dass sie Informationen stets prüfend analysieren, um zu einer differenzierten Beurteilung zu gelangen.

(5) Bewertungsstrukturwissen

Im Zusammenhang mit Bewertungskompetenz (entsprechend der Bildungsstandards für den Mittleren Schulabschluss) sieht Höttecke (2013, vgl. S. 9) den Erwerb von Wissen über Bewertungsstrukturen als zentral an. Sogenanntes Bewertungsstrukturwissen beinhaltet Kenntnisse über den Prozess (den Ablauf) des Beurteilens bzw. Entscheidens, also darüber, wie man zu einer Einschätzung gelangen kann. In den naturwissenschaftlichen Fachdidaktiken wurde Bewertungskompetenz anhand eines Rahmenmodells für Entscheidungsprozesse (siehe auch Betsch, Funke und Plessner 2011, S. 75) konzipiert (vgl. Höttecke 2013, Hostenbach et al. 2011), das auch zur Begründung eines Kompetenzmodells herangezogen wurde (vgl. Eggert und Bögeholz 2006). Das Modell beschreibt aus psychologischer Sicht im Wesentlichen drei Phasen von Entscheidungsprozessen sowie die darin stattfindenden Prozesse. Die Vermittlung von Strukturwissen über Bewertungen orientiert sich an diesem Modell. Dabei sollen sowohl einzelne Schritte bestimmter Entscheidungsphasen reflektiert werden, als auch mögliche Entscheidungsstrategien (kompensatorisch, non-kompensatorisch) (vgl. Eggert und Bögeholz 2006, S. 190). Im *Göttinger Modell der Bewertungskompetenz* wird die Reflexion des Bewertungsprozesses und -ergebnisses als eine von vier Teilkompetenzen angesehen (vgl. ebd.), was die Bedeutung von Bewertungsstrukturwissen unterstreicht. Eine praktische Umsetzungsmöglichkeit wird zum Beispiel von Knittel und Mikelskis-Seifert (2013) beschrieben. Die Autorinnen verwenden ein zyklisches Schema zur Visualisierung eines sechsstufigen Urteilsprozesses im Unterricht. Der sogenannte „Urteilskreislauf" stellt dabei einerseits eine Unterstützung bzw. Anleitung für das Vorgehen der Schüler dar (eigentlicher Bewertungsprozess). Andererseits bietet er eine Reflexionsgrundlage zur Analyse des Bewertungsprozesses der Lernenden. Der Kreislauf enthält dazu die folgenden Schritte:

1. Beschreibung der Problemsituation
2. Nennung der möglichen Entscheidungsoptionen
3. Begründung der einzelnen Entscheidungsoptionen (Für und Wider)
4. Gewichtung und Abwägung dieser Begründungen
5. eigene Entscheidung und Begründung
6. Folgenabschätzung der gewählten Entscheidungsoption (vgl. ebd., S. 24)

Diese Schrittfolge kann auch bei der Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Kontroversen helfen, die Beurteilung der unterschiedlichen, gegensätzlichen Fachpositionen zu strukturie-

ren. Dabei repräsentieren die verschiedenen fachwissenschaftlichen Standpunkte einer Kontroverse die Entscheidungsoptionen, die einer Beurteilung unterzogen werden können. Die ersten drei Schritte des Kreislaufs sind damit direkt auf die Analyse wissenschaftlicher Kontroversen übertragbar. Punkt vier ist für Schüler je nach inhaltlichem Anspruch sicher nicht immer durchführbar. Möglicherweise fehlt es den Schülern auch an für sie sinnvollen Wichtungskriterien, um diesen Punkt zu realisieren. Die beiden letzten Schritte können im Schulkontext vermutlich weitestgehend vernachlässigt werden, da es, wie im Abschnitt (2) *Diskutieren und Argumentieren* erläutert, fraglich ist, ob Schüler unbedingt eine eigene Entscheidung zwischen den einzelnen Optionen treffen sollten. Über die (zumindest teilweise) Beurteilung der kontroversen fachinhaltlichen Positionen hinaus, können Schüler anhand einer solchen Schrittfolge auch allgemein lernen, wie eine systematische (innerfachliche) Bewertung erfolgen kann.

(6) *Nature of Science* thematisieren

Wie in den Kapiteln 2.2 (ab S. 34) und 2.3 (ab S. 45) ausführlich dargelegt, bieten wissenschaftliche Kontroversen im Unterricht die Gelegenheit *Nature-of-Science*-Aspekte zu thematisieren. Um dieses Bildungspotenzial geeignet zu nutzen, kann auf naturwissenschaftsdidaktische Erkenntnisse zur effektiven Gestaltung von *Nature-of-Science*-Lernprozessen zurückgegriffen werden. Lederman (2007, vgl. S. 869) weist in diesem Zusammenhang beispielsweise besonders darauf hin, dass *Nature-of-Science*-Verständnis vor allem durch explizite und reflexive Unterrichtskonzepte zu fördern. Weitere „Leitlinien" für den Unterricht zur Vermittlung von *Nature of Science* wurden von Henke (2016, S. 125 f.) entwickelt. Er nennt die folgenden fünf Prinzipien zur gelingenden Vermittlung von *Nature of Science*:

- *Authentizität*: Den Lernenden sollten zum Beispiel wissenschaftliche Problemstellungen authentisch präsentiert werden oder adäquate Erfahrungen in Verbindung mit wissenschaftlichen Denk- und Arbeitsweisen ermöglicht werden. (vgl. ebd., S. 125)

- *Reflexivität*: Die Schüler sollten mithilfe konkreter Aufgabenstellungen motiviert werden, Inhalte des Unterrichts in Bezug auf *Nature of Science* zu reflektieren. (vgl. ebd., S. 125 f.)

- *Explizitheit*: *Nature-of-Science*-Aspekte sollten wie „herkömmliche" Fachinhalte explizit im Unterricht vermittelt werden. (vgl. ebd., S. 126)

- *Fachintegration*: *Nature of Science* sollte nicht unabhängig von Fachinhalten vermittelt werden. (vgl. ebd.)

- *Elementarisierung*: Auch *Nature-of-Science*-Inhalte müssen elementarisiert werden, um adressatengerecht vermittelt werden zu können. (vgl. ebd.)

Diese Gestaltungsaspekte bieten eine fundierte Grundlage zur Implementierung von *Nature-of-Science*-Lerngelegenheiten im Physikunterricht in Verbindung mit wissenschaftlichen Kontroversen. Besonders die beiden Gesichtspunkte Authentizität und Fachintegration dürften mithilfe wissenschaftlicher Kontroversen leicht erfüllt werden können, da sie kontroversen wissenschaftlichen Themen geradezu inhärent sind.

Die dargelegten Erwägungen für den Umgang mit wissenschaftlichen Kontroversen im Physikunterricht zeigen, dass die Realisierung des zugehörigen Bildungswertes im Bereich der Kommunikations- aber auch der Erkenntnisgewinnungskompetenz durch die konkrete Unterrichtsgestaltung bestimmt wird und damit in der Verantwortung der Lehrkräfte liegt. Diese sollten folgende Aspekte bei der Planung und Durchführung entsprechender Unterrichtskonzepte besonders berücksichtigen:

(1) Multiperspektivität zur Umsetzung des Kontroversitätsprinzips ermöglichen und die Aufgeschlossenheit der Lernenden fördern

(2) Möglichkeiten zum Diskutieren und Trainieren der Argumentationsfähigkeiten der Lernenden integrieren

(3) dabei unterstützen, Informationsklarheit (beispielsweise durch geeignete Recherchen und das Explizieren nicht vorhandener Wissensbestände) zu gewinnen sowie einen bewussten, kritischen Umgang mit Informationsquellen einfordern

(4) Lernende grundsätzlich zu einer kritischen Haltung ermutigen

(5) Bewertungsstrukturwissen zur Reflexion der eigenen Urteilsprozesse vermitteln

(6) explizit *Nature-of-Science*-Aspekte thematisieren

Anhand bestehender Empfehlungen für den Umgang mit gesellschaftlich relevanten Kontroversen bzw. Socio-Scientific Issues konnten somit didaktische Hinweise für die Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Kontroversen im naturwissenschaftlichen Unterricht aufgestellt werden. Offen bleibt soweit allerdings die Frage, wie Lehrkräfte bisher, ohne ein gezieltes Schulungsprogramm, mit wissenschaftlichen Kontroversen im Physikunterricht umgehen. Im folgenden Kapitel wird beschrieben, welche Einblicke die fachdidaktische Forschung hierzu bisher gewinnen konnte.

2.4.2 Der Umgang von Lehrkräften mit wissenschaftlichen Kontroversen im naturwissenschaftlichen Unterricht

Zu der Frage, wie Lehrkräfte im naturwissenschaftlichen Unterricht (insbesondere im Physikunterricht) mit wissenschaftlichen Kontroversen umgehen, liegen bisher kaum fachdidaktische Forschungsergebnisse vor. Erkenntnisse dazu wären jedoch aus physikdidaktischer Sicht wünschenswert, um einschätzen zu können, inwieweit Physiklehrkräfte das Potenzial wissenschaftlicher Kontroversen nutzen können und ob gegebenenfalls Fortbildungsprogramme für Lehrkräfte oder Ausbildungsinhalte für Physiklehramtsstudierende entwickelt werden sollten. Dies ist ein wichtiges Untersuchungsziel für die Fachdidaktik, da es von den Lehrkräften abhängt, inwieweit wissenschaftliche Kontroversen Unterrichtsinhalte sind und Lernende von deren Bildungswert (siehe Kapitel 2.2, ab S. 34) profitieren können. In diesem Abschnitt soll deshalb vorgestellt werden, welche fachdidaktischen Einblicke die Studie von Dunlop und Veneu (2019) diesbezüglich gewährt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Studie nicht auf Unterrichtsbeobachtungen beruht und somit keine direkten Schlüsse in Hinblick auf tatsächlichen

Unterricht gezogen werden können. Weitere empirische Untersuchungen sind im konkreten Zusammenhang mit der Frage nach dem Umgang von Lehrkräften der naturwissenschaftlichen Fächer mit wissenschaftlichen Kontroversen soweit nicht bekannt.

Dunlop und Veneu (2019) befragten mithilfe halbstrukturierter Interviews 18 englische Lehrkräfte der naturwissenschaftlichen Fächer (7 Biologielehrkräfte, 6 Physiklehrkräfte, 5 Chemielehrkräfte), um zu untersuchen, inwieweit wissenschaftliche Kontroversen eine Rolle im Unterricht dieser Lehrkräfte spielen und wie sie mit diesen umgehen. Dabei beziehen sich die Forscherinnen in Anlehnung an die von Wazeck (2013) unterschiedenen Arten wissenschaftlicher Kontroversen (siehe Kapitel 2.1.2, S. 31) auf Kontroversen in der Wissenschaft (vgl. Dunlop und Veneu 2019, S. 691), was zum Begriffsverständnis wissenschaftlicher Kontroversen, wie es in der vorliegenden Arbeit verwendet wird, passt. Auch Dunlop und Veneu gelangen zu der Einschätzung, dass solche wissenschaftlichen Kontroversen „are less well understood in educational settings" (ebd.). In den Interviews gaben die Autorinnen den Lehrkräften keine bestimmten wissenschaftlichen Kontroversen vor, so dass sich diese anhand eigener Themen äußerten. Das bedeutet allerdings auch, dass die Kontexte, in denen die Aussagen der Lehrkräfte stehen, differieren können. Mithilfe einer qualitativen Analyse entwickelten die Forscherinnen sogenannte „soziale Repräsentationen" zum Wesen und Unterrichten wissenschaftlicher Kontroversen. Dabei subsumieren sie unter diesen sozialen Repräsentationen sowohl beliefs als auch Wertevorstellungen und Methoden oder Vorgehensweisen der Lehrkräfte zu wissenschaftlichen Kontroversen und deren Lehre (vgl. ebd., S. 694). Insgesamt arbeiten Dunlop und Veneu die folgenden sechs sozialen Repräsentationen aus:

(1) Wissenschaftliche Kontroversen sind dichotom und theorieabhängig sowie zentral für die wissenschaftliche Praxis.

(2) Das Unterrichten wissenschaftlicher Kontroversen ist dem Unterrichten „der Fakten" und dem Abdecken des Curriculums untergeordnet.

(3) Das Unterrichten von Kontroversen ist riskant.

(4) Im Umgang mit Kontroversen ist ein Gleichgewicht erreichbar und wünschenswert.

(5) Lehrkräfte dürfen ihre eigenen Ansichten nicht teilen.

(6) Lehrkräfte und Schüler verfügen nicht über ausreichende Kenntnisse, um mit wissenschaftlichen Kontroversen in der Schule umzugehen. (ebd., S. 699)

Anhand der Repräsentationen wird deutlich, dass die Vorstellungen oder Ideen zum Unterrichten wissenschaftlicher Kontroversen nicht immer geeignet erscheinen. So sehen die befragten Lehrkräfte in wissenschaftlichen Kontroversen das Bestehen lediglich zweier, sich gegenüberstehender Positionen (siehe (1)) (vgl. ebd., S. 699 f.). Diese Auffassung wird aber häufig nicht der vielfältigen Perspektiven auf eine kontroverse Problemstellung gerecht werden können (siehe Kapitel 2.4.1, (1) S. 71), wodurch im Unterricht nur teilweise Multiperspektivität erreicht werden wird. Auf der anderen Seite stellen die Lehrkräfte in (1) Bezüge zur Theoriegeladenheit wissenschaftlichen Wissens her und zeigen ein Bewusstsein für die Interpretationsbedürftigkeit wissenschaftlicher Daten (vgl. ebd.).

Problematisch sind die Äußerungen der Lehrkräfte im Hinblick auf die Bedeutung wissenschaftlicher Kontroversen für den Unterricht (siehe (2)). Obwohl die Befragten Kontroversität als ein wesentliches Element der Wissenschaft ansehen, werden Kontroversen in der Wissenschaft nicht unbedingt als unterrichtsrelevant eingestuft (vgl. ebd., S. 701). Demgegenüber wird das Unterrichten der Sachinhalte als wesentlicher angesehen, da die Lehrkräfte sich in der Verantwortung sehen, ihre Schüler auf Abschlussprüfungen vorzubereiten und ihnen insgesamt gute Noten zu ermöglichen. Da in Prüfungssituationen aber kaum Kompetenzen im Umgang mit wissenschaftlichen Kontroversen notwendig sind, werden diese auch im Unterricht vernachlässigt. Für die Lehrkräfte zählen vor allem die curricular vorgeschriebenen Lerninhalte. Da Kontroversen hier nicht weiter vertreten sind, erscheint es nicht sinnvoll, Unterrichtszeit in die Auseinandersetzung mit kontroversen wissenschaftlichen Themen zu investieren (vgl. ebd., S. 700). Solange Lehrkräfte jedoch keine Notwendigkeit für die Integration wissenschaftlicher Kontroversen im Schulunterricht sehen, wird deren Bildungswert nicht genutzt werden können. Das Problem könnte im Umkehrschluss dadurch gelöst werden, dass wissenschaftliche Kontroversen explizit im Curriculum verortet werden. Ungünstig ist ein naturwissenschaftlicher Unterricht exklusive kontroverser Fachinhalte auch für das *Nature-of-Science*-Verständnis der Lernenden, da wissenschaftliche Praxis verzerrt abgebildet wird. Wenn der Diskurs unter Wissenschaftlern im Unterricht ausgeklammert wird, ist das eher einem *Nature-of-Science*-Konzept zuträglich, in dem wissenschaftliche Erkenntnisse als sicher und feststehend gelten. Dunlop und Veneu argumentieren außerdem, dass die Lehrkräfte von einer Unvereinbarkeit zwischen der Vermittlung von Sachwissen und kontroversen Themen ausgehen, die tatsächlich nicht existiere. Denn bei der Beschäftigung mit wissenschaftlichen Kontroversen können Schüler ihr Sachwissen anwenden oder dazu motiviert werden, sich neue Lerninhalte anzueignen (vgl. ebd. S.700 f.). Prinzipiell, so Dunlop und Veneu, sind die Lehrkräfte durchaus in der Lage, mögliche Unterrichtsaktivitäten anzugeben, die den Umgang mit wissenschaftlichen Kontroversen im Unterricht ermöglichen. Beispielsweise werden von den Lehrkräften verschiedene Diskussionsformate, der Einsatz von concept cartoons, das Verfassen von Argumentationen, die Prüfung von Informationen, die Nutzung von Videos zur Einführung in ein Thema, Storytelling oder ein problemorientierter Unterricht erwogen (vgl. ebd., S. 701). Hier lassen sich bereits Anknüpfungspunkte an die in Kapitel 2.4.1 (ab S. 67) diskutierten unterrichtspraktischen Möglichkeiten zur Auseinandersetzung mit kontroversen Themen in der Wissenschaft entdecken, wie das Trainieren von Argumentationsfähigkeiten oder das kritische Hinterfragen von Informationen. Auf der anderen Seite finden sich bei Dunlop und Veneu keine Hinweise darauf, dass die Lehrkräfte wissenschaftliche Kontroversen im Unterricht als Gelegenheit zur Thematisierung verschiedener *Nature-of-Science*-Aspekte ansehen.

Interessant ist, dass die Lehrkräfte in der Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Kontroversen im Unterricht eine Gefahr (siehe (3)) mit Blick auf das Vertrauen der Schüler in wissenschaftliche Erkenntnisse sehen (vgl. ebd., S. 701 f.). Scheinbar nehmen die Interviewten an, die Schüler würden von der Kontroversität und diskursiven Arbeitsweise in der Wissenschaft möglicherweise auf eine generelle, zu starke Relativierung wissenschaftlicher Ergebnisse und Aussagen schlussfolgern. Dabei bieten wissenschaftliche Kontroversen im Gegenteil Anlässe, die fachspezifischen Gütekriterien und Standards der wissenschaftlichen Praxis (z. B. Reproduzierbarkeit, Transparenz, Peer-Review-Verfahren etc.) offenzulegen, die das Vertrau-

en in wissenschaftliche Erkenntnisgewinnung eher stützen sollten. Ein ähnliches Verständnis teilen wahrscheinlich auch Dunlop und Veneu, die ebenfalls eine Chance im Verständnis für Meinungsverschiedenheit und Uneinigkeit unter Wissenschaftlern sehen, Schüler in ihrem reflektierten Vertrauen in die Wissenschaft zu bekräftigen (vgl. ebd., S. 702). Unangemessen sei demgegenüber die Ausblendung wissenschaftlicher Diskurse im Unterricht, da Lehrkräfte den Lernenden wissenschaftliches Wissen dann als sicherer präsentierten, als es eigentlich ist und kein adäquates Bild der Wissenschaften vermittelten würden (vgl. ebd.).

Die Repräsentationen (4) und (5) geben Aufschluss über die Ansichten der Lehrkräfte zum Vertreten eines eigenen Standpunktes und einer möglichst ausgeglichenen, neutralen Darstellung der kontroversen Fachpositionen im Unterricht. An sich ist die Idee der Lehrkräfte, dass unterschiedliche Positionen im Unterricht widergespiegelt werden sollten, so dass sich die Schüler selbst eine eigene Meinung bilden können (vgl. ebd., S. 703), gut mit dem Kontroversitätsprinzip vereinbar. Allerdings stößt dies auf Grenzen und Kritik, wie in Kapitel 2.4.1 (ab S. 67) erläutert wurde. Diese Bedenken erkennen auch Dunlop und Veneu prinzipiell an, wenngleich sie hier einen Unterschied sehen:

> In contrast to controversies *about* science, where balance is likely to be illusory, in the case of controversies *in* science, the pursuit of balance is perhaps more credible because teachers and students alike are less likely to be emotionally invested in competing positions: the disagreement relates to intellectual rather than emotional tension [Hervorhebung im Original]. (ebd., S. 703 f.)

Inwiefern die Sachgebundenheit der Diskussion allerdings vor Verzerrungen bei der Darstellung im Unterricht schützen kann, ist unklar. Schließlich dürfte der eigene fachliche Standpunkt des Lehrers sogar wesentlich die Auswahl und Gestaltung von Lerninhalten beeinflussen. Ebenfalls fragwürdig (siehe Kapitel 2.4.1, ab S. 67) ist die von den Lehrkräften vorgebrachte Idee, sie sollten im Unterricht objektiv sein, ohne selbst eine konkrete Position zu vertreten (siehe (5)) (vgl. ebd., S. 704). Ähnliche Ergebnisse zu den Ansichten von Lehrkräften in Bezug auf Neutralität und Ausgewogenheit werden aber auch von Dillon, Grace und Oulton (2004, vgl. S. 4) für Kontroversen im naturwissenschaftlichen Unterricht und von Stradling (1984, vgl. S. 125) für Kontroversen im Unterricht allgemein genannt.

Als Herausforderung betrachten die von Dunlop und Veneu interviewten Lehrkräfte vor allem auch, über das notwendige Fachwissen zu verfügen (siehe (6)). Die Lehrkräfte sehen hier eigene fachliche Defizite, die einer Behandlung wissenschaftlicher Kontroversen im naturwissenschaftlichen Unterricht entgegenstehen könnten. Fehlendes Expertenwissen verursacht Unsicherheit, die dazu führt, dass die Lehrkräfte kontroversen wissenschaftlichen Themen im Unterricht gegenüber kritisch sind (vgl. ebd., S. 705). Auch die eigene fachliche und fachdidaktische Vertiefung oder systematische Aktualisierung des Fachwissens werden dabei als limitierende Faktoren gesehen (vgl. ebd): Wie können Lehrkräfte auf dem jeweils aktuellen Stand der Forschung bleiben? Wie können aktuelle wissenschaftliche Themen für den Unterricht vereinfacht und aufbereitet werden? Zusätzlich sind die Lehrkräfte davon überzeugt, dass ihre Schüler nicht über die erforderlichen fachlichen Voraussetzungen verfügen, um sich im Schulunterricht mit wissenschaftlichen Kontroversen geeignet auseinandersetzen zu können (vgl. ebd.). Dem halten Dunlop und Veneu eine veränderte Zielperspektive entgegen:

> Teaching scientific controversy requires more than knowing: it calls for questioning, application, evaluation and argumentation in assessing different knowledge claims. (ebd.)

Das heißt, die fachliche Durchdringung einer wissenschaftlichen Kontroverse muss nicht das entscheidende Lernziel sein, da andere Bildungsinhalte im Zusammenhang mit Kontroversen im naturwissenschaftlichen Unterricht angestrebt werden können. Darüber hinaus ist für den Fachinhalt eine didaktische Rekonstruktion genauso notwendig, aber auch möglich, wie für andere (wenn auch anspruchsvolle) Themen des Physikunterrichts auch.

Die Autorinnen der Studie leiten aus den Ergebnissen ihrer Erhebung zusammenfassend ab, dass Lehrkräfte in Bezug auf das Unterrichten mit und über wissenschaftliche Kontroversen Unterstützung benötigen (vgl. ebd., S. 707). Hierzu sind einerseits Fortbildungen denkbar, die allgemeine Prinzipien oder Strategien zur Integration wissenschaftlich kontroverser Fragestellungen im Unterricht vermitteln. Andererseits könnte es auch einen Bedarf für spezifische Angebote zur Vertiefung bestimmter fachwissenschaftlicher Inhalte geben.

Da die vorgestellte Untersuchung die einzige bekannte empirische Studie im Bereich der Naturwissenschaftsdidaktik ist, stellen Erkenntnisse zum Umgang von Physiklehrkräften mit wissenschaftlichen Kontroversen im Unterricht weiterhin ein Forschungsdesiderat dar. Beispielsweise ist ungeklärt, inwiefern Physiklehrkräfte Elemente des in Kapitel 2.2 (ab S. 34) skizzierten Bildungswertes im Unterrichtskontext realisieren können, wie sie in Unterrichtssituationen reagieren würden und wie sie mit einer konkreten Fachkontroverse zunächst selbst umgehen. Sich daraus ergebende Forschungsziele und Untersuchungsfragen, werden für diese Arbeit in Kapitel 4 (ab S. 141) entwickelt.

2.5 Wissenschaftliche Kontroversen als Entscheidungssituation für Lehrkräfte

Werden Physiklehrkräfte mit einer wissenschaftlichen Kontroverse zu einem lehr- bzw. bildungsplanrelevanten physikalischem Thema konfrontiert, werden zwangsläufig Urteils- und Entscheidungsvorgänge initiiert, da die Relevanz für eine Auseinandersetzung im Schulkontext bewertet und für die Aufbereitung im Unterricht mögliche Optionen abgewogen werden müssen. Dieser Prozess beinhaltet sowohl fachwissenschaftliche als auch fachdidaktische Erwägungen. Sehen sich Lehrkräfte einer solchen Situation gegenübergestellt, müssen sie Argumente gewichten, die verschiedenen Fachpositionen und didaktischen Handlungsmöglichkeiten kritisch bewerten sowie sich ein Bild vom Für und Wider dieser Positionen mit Bezug auf ihre eigene professionelle Lehrtätigkeit machen. Lehrkräfte befinden sich damit in einer Entscheidungssituation, da sie prinzipiell vor der Beantwortung der folgenden Frage stehen: *Wie stelle ich das Thema in meinem Unterricht dar?*

Entscheidungsprozesse und Urteile, die innerhalb dieser Situation getroffen werden, können aus Sicht der Psychologie des Denkens beschrieben werden. Betsch, Haberstroh und Höhle (2002, vgl. S. 456 f.) führen zur Strukturierung dieses Entscheidungsprozesses ein Stufenmodell ein, in dem sie Phänomene und Effekte verschiedener Teilprozesse zusammenfassen, die in der Psychologie bekannt sind und zumindest teilweise durch Entscheidungstheorien erklärt bzw. beschrieben werden können. Dieses Rahmenmodell für den Prozess des Entscheidens (vgl. Betsch, Funke und Plessner 2011, S. 75) ist in den naturwissenschaftlichen Fachdidaktiken bereits etabliert und wurde für die Begründung von Kompetenzmodellen zur Bewertungskompetenz herangezogen (vgl. Eggert und Bögeholz 2006; Höttecke 2013; Hostenbach et al. 2011). Es gliedert den Entscheidungsprozess in drei Phasen (vgl. Betsch, Funke und Plessner 2011, S. 75; siehe Abbildung 2.1, S. 85):

1. *präselektionale Phase* (vgl. ebd., S. 76):
   Zuerst wird eine Situation als Entscheidungssituation erkannt. Anschließend beginnt die Informationssuche, die mit unterschiedlichen Entscheidungsstrategien in Verbindung stehen kann, bei denen bestimmte Bewertungskriterien (analytische Strategien) berücksichtigt werden (vgl. ebd., S. 100 ff.). Für die Entscheidung bedeutsame Informationen können dabei sowohl im eigenen Gedächtnis oder der äußeren Umwelt gefunden werden. Den Informationen werden dabei die möglichen Handlungsoptionen sowie Attribute dieser Optionen (insbesondere die Wahrscheinlichkeiten möglicher Konsequenzen) entnommen. Diese Teilprozesse gehen der eigentlichen Entscheidung voraus, beeinflussen diese aber maßgeblich.

2. *selektionale Phase* (vgl. ebd., S. 75):
   Es wird die eigentliche Entscheidung getroffen. Die möglichen Handlungsoptionen und deren Konsequenzen werden bewertet (Bewertungskriterien), so dass anhand dessen eine Auswahl einer Option erfolgt, im dem Sinne, dass sich eine Absicht ausbildet, die gewählte Option umzusetzen.

3. *postselektionale Phase* (vgl. ebd., S. 76):
   Nach der Entscheidung für eine Option folgt in dieser Phase die Umsetzung der Hand-

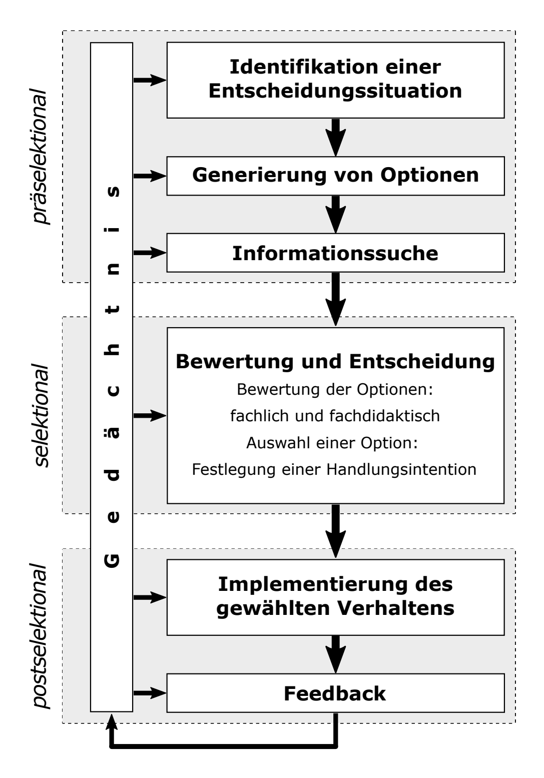


Abbildung 2.1: Rahmenmodell des Entscheidungsprozesses nach Betsch, Funke und Plessner 2011 (S. 75, Abb. 7.4)

lungsabsicht in tatsächliches Verhalten. Dadurch können Erfahrungen mit der getroffenen Entscheidung gesammelt werden, da das Verhalten schließlich auch ein Feedback der Umwelt bewirkt. Aufgrund dieser Informationen können Lernprozesse initiiert werden, die Einfluss auf zukünftige Entscheidungsprozesse nehmen können.

Für die Auseinandersetzung einer Lehrkraft mit einer wissenschaftlichen Kontroverse, deren Thematik wichtig für einen bestimmten Unterrichtsinhalt ist, können sich diese drei Phasen zum Beispiel konkret wie folgt darstellen:

1. *präselektionale Phase*:
   Die Feststellung unterschiedlicher, miteinander unvereinbarer Positionen zu einem unterrichtsrelevanten Inhalt führt zu der Entscheidungsfrage: Wie soll dieser Inhalt im Unterricht dargestellt werden? Als Antwort auf diese Frage werden die prinzipiellen Möglichkeiten, die Thematik zu unterrichten (inklusive wichtiger Schritte einer notwendigen didaktischen Rekonstruktion), unterschieden. Zum Beispiel könnten die folgenden Optionen für den Unterricht erwogen werden:
   - Das Thema wird wie in der Vergangenheit unterrichtet.
   - Es wird genau eine der verschiedenen fachlichen Positionen im Unterricht abgebildet.
   - Die Kontroversität des Inhaltes wird multiperspektivisch vermittelt.

Davon ausgehend werden Hintergrund- und Sachinformationen zusammengetragen, Belege für verschiedene Aussagen gesucht, Argumente überprüft und verglichen, Diskussionspunkte nachvollzogen, didaktische Konsequenzen für die Umsetzung im Unterricht abgeleitet und gegebenenfalls bestimmte Bewertungskriterien für die Sichtung und Einordnung dieser Informationen herangezogen. Beispielsweise könnten sich Lehrkräfte auch ganz konkret überlegen, welche Fragen oder Probleme Schüler im Unterricht bei einer bestimmten Darstellung haben könnten, wie sich die Ansätze vor dem Hintergrund übergeordneter Lernziele rechtfertigen lassen oder inwieweit Einschränkungen durch Vorgaben des Lehr- bzw. Bildungsplanes bestehen.

2. *selektionale Phase*:
   Die verschiedenen Möglichkeiten zur Darstellung des Inhaltes im Unterricht werden miteinander verglichen und bewertet. Dabei müssen sowohl fachwissenschaftlich als auch fachdidaktische Aussagen, Argumente und Konsequenzen beurteilt und gewichtet werden. Bei dieser Bewertung können beispielsweise Kriterien der fachlichen Logik und Korrektheit, aber auch fachdidaktische Kriterien, wie die Verständlichkeit bzw. Nachvollziehbarkeit eines Zugangs, die Anschlussfähigkeit oder Fragen der Leistungsbewertung einbezogen werden, um zu einer Entscheidung zu gelangen. Aus dieser Abwägung resultiert schließlich die Festlegung auf eine bestimmte Darstellung des Inhaltes im Unterricht. Diese Handlungsintention kann zum Beispiel anhand konkreter Unterrichtsplanungen oder der Formulierung von Lernzielen sichtbar gemacht werden.

3. *postselektionale Phase*:
   Entsprechend der Entscheidung für eine bestimmte Darstellung des Inhaltes im Unterricht wird dieser durchgeführt. Dabei werden die Schüler, möglicherweise auch deren Eltern oder die Kollegen der Lehrkraft auf den Unterricht reagieren und Rückmeldungen (z. B. zum Lernerfolg, entstandene Fragen oder Problemen) liefern, die von der Lehrkraft reflektiert werden können.

Das vorgestellte Rahmenmodell für den Prozess des Entscheidens scheint damit günstig für eine Analyse der Auseinandersetzung von Lehrkräften mit einer wissenschaftlichen Kontroverse zu sein. Es ermöglicht die Strukturierung einer entsprechenden fachdidaktischen Untersuchung und gibt Hinweise in Bezug auf das Design einer solchen Erhebung und die Auswahl möglicher Instrumente (siehe Kapitel 4, ab S. 141 und Kapitel 5, ab S. 147).

3 Beispiel einer wissenschaftlichen Kontroverse: Die relativistische Masse in der Speziellen Relativitätstheorie

Physikalische Begriffe sind freie Schöpfungen des menschlichen Geistes und, obwohl es so scheinen mag, nicht eindeutig durch die Außenwelt bestimmt.
— Albert Einstein und Leopold Infeld, *Die Evolution der Physik*

3.1 Darstellung der verschiedenen wissenschaftlichen Positionen

3.1.1 Beschreibung der beiden Ansätze zum Massebegriff

In Kapitel 3 wird exemplarisch eine konkrete wissenschaftliche Kontroverse dargestellt. Dazu wird die Fragestellung analysiert, ob die Masse eines Objektes in der Speziellen Relativitätstheorie von der Geschwindigkeit dieses Objektes abhängig ist. Eine Frage, zu der Adler (1987, S. 739) schreibt:

> [...] a question my son asked me after his first day of high school physics. My answer, „No!" „Well, yes ..." „Actually, no, but don't tell your teacher."

Inwiefern sich Physiker in Bezug auf diese Frage uneinig sind (vgl. Kneubil 2018, S. 13; Hecht 2009a, S. 336) und der mit ihr verbundene Begriff der sogenannten *relativistischen Masse* kontrovers diskutiert wird (vgl. z. B. Petkov 2009, S. 114; Jammer 2000, S. 54; Millette 2017, S. 202), soll in den Kapiteln 3.1 und 3.2 beschrieben werden. Insgesamt dient die Betrachtung dieser konkreten wissenschaftlichen Kontroverse drei übergeordneten Zielen:

1. Wissenschaftliche Kontroversen besitzen für den naturwissenschaftlichen Unterricht einen besonderen Bildungswert (siehe Kapitel 2.2, ab S. 34). Allerdings stellen physikdidaktische Erkenntnisse zum Umgang von Physiklehrkräften mit solchen Kontroversen und der damit verbundenen möglichen Realisierung dieses Bildungswertes ein Forschungsdesiderat dar (siehe Kapitel 2.3.3, ab S. 61 und Kapitel 2.4.2, ab S. 79). Für die Untersuchung dieses Forschungsbereichs bedarf es einer konkreten Kontroverse in der Physik als fachinhaltlichem Kontext einer entsprechenden Erhebung. Die hier dargestellte Kontroverse zum Begriff der relativistischen Masse wird dazu im Rahmen der im Teil II dieser

Arbeit vorgestellten empirischen Untersuchung verwendet und soll an dieser Stelle im vorliegenden Abschnitt 3.1 als Grundlage dafür hinreichend aufgearbeitet werden.

2. Die Beschreibung einer bestimmten wissenschaftlichen Kontroverse illustriert beispielhaft die in Kapitel 2.1.2 (ab S. 24) aufgestellten Merkmale zur Charakterisierung wissenschaftlicher Kontroversen. Damit soll die hier vorgestellte Kontroverse einen Beitrag zur Begriffsbildung bzw. dessen Anwendung leisten. Diese Zielstellung ist insbesondere für die beiden Abschnitte 3.1.2 (ab S. 101) und 3.2 (ab S. 122) leitend.

3. Die Thematik der relativistischen Masse, die in diesem Kapitel als wissenschaftliche Kontroverse dargestellten wird, ist auch Inhalt der Lehr- bzw. Bildungspläne einiger deutscher Bundesländer (siehe Tabelle 3.4, S. 127). Die Aufbereitung dieses Lerninhaltes eröffnet somit eine neue physikdidaktische Perspektive auf die Darstellung dieses Themas im Schulunterricht, wie sie vor allem im Abschnitt 3.3 (ab S. 126) erläutert werden soll.

Im vorliegenden Abschnitt 3.1.1 wird zunächst allgemein beschrieben, welche verschiedenen Positionen in der Physik hinsichtlich der Verwendung der Begrifflichkeit einer geschwindigkeitsabhängigen relativistischen Masse bestehen. Hierzu werden wesentliche Aussagen der beiden zugrundeliegenden Massekonzepte in der Speziellen Relativitätstheorie dargestellt, um einen Überblick zu den beiden fachwissenschaftlichen Standpunkten zu erhalten. Anschließend werden diese Positionen genauer problematisiert, indem einzelne Argumente und Diskussionspunkte in Kapitel 3.1.2 systematisch erfasst werden.

Zwei verschiedene Massekonzepte in der Speziellen Relativitätstheorie

In seiner Speziellen Relativitätstheorie formulierte Albert Einstein die physikalischen Konzepte von Raum und Zeit neu. Zeitintervalle und Längenmaßstäbe sind bei Einstein nicht länger wie einst für Newton absolute Größen, sondern abhängig vom jeweiligen Bezugssystem - sie sind relativ. Inwiefern allerdings auch dynamische Eigenschaften von Körpern, insbesondere deren Masse, im Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie revidiert werden müssen und nur in Abhängigkeit vom jeweiligen Bezugssystem betrachtet werden können, soll im Folgenden genauer beleuchtet werden.

Blickt man in verschiedene Lehrbücher der Physik (siehe Tabelle 3.1, S. 89, nicht repräsentative Auswahl), die für Studierende in der universitären Ausbildung geeignet sind, zeichnen sich prinzipiell zwei unterschiedliche Konzepte zur Masse von Objekten ab, die sich in der Frage danach unterscheiden, ob die Masse eines Objektes abhängig vom gewählten Bezugssystem und damit dessen Geschwindigkeit ist:

- Ansatz 1 (Pro $m(v)$):
  In einem Teil der Lehrbücher wird man auf den Ansatz stoßen, zwischen der Ruhemasse m_0 eines Objektes und seiner relativistischen Masse $m_r = \frac{m_0}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}}$ zu unterscheiden. Letztere ist eine vom Bezugssystem abhängige Größe, die mit der Geschwindigkeit v eines Objektes zunimmt: $m_r = m(v)$.

- Ansatz 2 (Anti $m(v)$):
  Ein anderer Teil der Lehrbücher verzichtet auf den Begriff der relativistischen Masse m_r

und beschreibt die Masse als invariante, also geschwindigkeitsunabhängige Größe m, die in jedem Bezugssystem denselben Wert besitzt.

Tabelle 3.1: Physiklehrbücher mit (Ansatz 1) bzw. ohne (Ansatz 2) geschwindigkeitsabhängige Masse $m(v)$

Ansatz 1 (Pro $m(v)$)	**Ansatz 2** (Anti $m(v)$)
Demtröder 2017: *Experimentalphysik. 4. Kern-, Teilchen- und Astrophysik*. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum	Boblest, Müller und Wunner 2016: *Spezielle und allgemeine Relativitätstheorie. Grundlagen, Anwendungen in Astrophysik und Kosmologie sowie relativistische Visualisierung*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum
Woodhouse 2016: *Spezielle Relativitätstheorie*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum	Bartelmann et al. 2015: *Theoretische Physik*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum
Wagner, Reischl und Steiner 2014: *Einführung in die Physik*. 3. erweiterte Auflage. Wien: Facultas Verlags- und Buchhandels AG	Tipler und Mosca 2015: *Moderne Physik*. 2. Auflage. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag
Mittelstaedt 2013: *Rational Reconstructions of Modern Physics*. Second Enlarged Edition. Dordrecht, Heidelberg, New York, London: Springer	Harris 2013: *Moderne Physik. Lehr- und Übungsbuch*. 2. aktualisierte Auflage. München: Pearson
Inverno 2009: *Einführung in die Relativitätstheorie*. 2. durchgesehene und korrigierte Auflage. Weinheim: WILEY-VCH	Giancoli 2010: *Physik. Lehr- und Übungsbuch*. 3. aktualisierte Auflage. München: Pearson Studium
Günther 2009: *Starthilfe Relativitätstheorie. Ein neuer Einstieg in Einsteins Welt*. 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner	Meschede (Hrsg.) 2010: *Gerthsen Physik*. 24. überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer
Petkov 2009: *Relativity and the nature of spacetime*. Second Edition. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer	Tsamparlis 2010: *Special Relativity. An Introduction with 200 Problems and Solutions*. Berlin, Heidelberg: Springer
Freund 2007: *Spezielle Relativitätstheorie für Studienanfänger*. Zürich: vdf Hochschulverlag	Forshaw und Smith 2009: *Dynamics and Relativity*. Chichester: WILEY
Rindler 2006: *Relativity. Special, General and Cosmological*. Second Edition. Oxford, New York: Oxford University Press	Halliday, Resnick und Walker 2009: *Halliday Physik*. 2. überarbeitete und ergänzte Auflage. Weinheim: WILEY-VCH
Goenner 2004: *Spezielle Relativitätstheorie und die klassische Feldtheorie*. 1. Auflage. München: Elsevier	Bethge und Schröder 2006: *Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen*. 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. Weinheim: WILEY-VCH

Ansatz 2 ist in dem Sinne mit der Newtonschen Mechanik vereinbar, als das auch dort die Masse eines Körpers eine invariante physikalische Größe ist (vgl. Bickerstaff und Patsakos

1995, S. 63). Das bedeutet, dass dieser Ansatz keine gänzlich neue Konzeption des Massekonzeptes in der Speziellen Relativitätstheorie gegenüber der klassischen Newtonschen Dynamik vorsieht. Der mathematische Ausdruck für die relativistische Masse $m_r = \frac{m_0}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}}$ (Ansatz 1) wurde laut Hecht (2009a, vgl. S. 339) 1908 erstmals von Lewis verwendet. Zusammen mit Tolman leitete er die geschwindigkeitsabhängige Masse aus mechanischen Stoßprozessen her. Okun (2006, vgl. 1329) gibt an, dass neben Lewis und Tolman auch andere namhafte Physiker wie beispielsweise Born das Konzept der relativistischen Masse befürworteten, so dass sich dieser Begriff bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts etablierte. Einstein selbst, so Hecht (2009b, vgl. S. 800), verwendete den Ausdruck $m_r = \frac{m_0}{\sqrt{1-(\frac{v}{c})^2}}$ für die relativistische Masse in keiner seiner Veröffentlichungen. Dennoch ging auch Einstein zeitweilig davon aus, dass die Masse eines Körpers nicht unabhängig von dessen Geschwindigkeit betrachtet werden kann. Nachdem Planck in einer Arbeit von 1906 die Gleichung des relativistischen Impulses ableitete, verwarf Einstein die Idee der geschwindigkeitsabhängigen Masse und ging fortan von einem invarianten Massebegriff aus (vgl. ebd., S. 799, 804). In einem Brief an Lincoln Barnett vom 19. Juni 1948 schrieb Einstein:

> Es ist nicht gut, von der Masse $M = \frac{m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ eines bewegten Körpers zu sprechen, da für M keine klare Definition gegeben werden kann. Man beschränkt sich besser auf die „Ruhe-Masse" m. Daneben kann man ja den Ausdruck für momentum[1] und Energie geben, wenn man das Trägheitsverhalten rasch bewegter Körper angeben will. (Albert Einstein, zitiert nach Okun 1989a, S. 32)

Detailliertere Aspekte der historischen Entwicklung der beiden Ansätze, besonders des Ansatzes 1, können beispielsweise bei Hecht (2009b), Hecht (2009a) oder Strnad (1991) nachgelesen werden, sollen hier aber nicht weiter vertieft werden.

Interessant ist an dieser Stelle allerdings die Frage, inwieweit die beiden verschiedenen Massekonzepte in der Fachwelt verbreitet sind und welche Relevanz sie folglich in der Fachliteratur haben. Oas (2008) analysierte zu diesem Zweck insgesamt 637 Arbeiten (darunter neben Physiklehrbüchern beispielsweise auch populärwissenschaftliche oder philosophische Werke und Science-Fiction-Literatur). Dabei stellt er unter anderem fest, dass 477 aller begutachteten Werke das Konzept der relativistischen Masse nutzen (vgl. ebd., S. 6). Die Untersuchung differenziert die berücksichtigten Werke nach vier verschiedenen Kategorien:

(a) Lehrbücher zur Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie
(siehe Abbildung 3.1, S. 91)

(b) Einführungslehrbücher und Lehrbücher zur modernen Physik
(siehe Abbildung 3.2, S. 91)

(c) populärwissenschaftliche Bücher über Relativität und Physik
(siehe Abbildung 3.3, S. 92)

(d) Sonstige (diverse Themen)

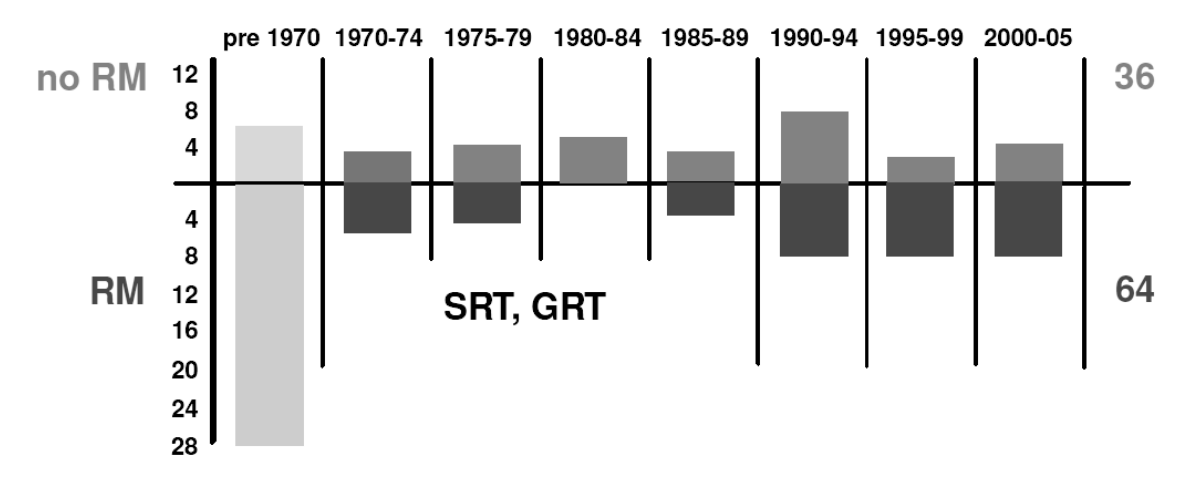


Abbildung 3.1: Lehrbücher zur Speziellen (SRT: Special Relativity Textbooks) und Allgemeinen Relativitätstheorie (GRT: General Relativity Textbooks) mit (RM) und ohne (no RM) Einführung der relativistischen Masse, geordnet nach dem Erscheinungsjahr (Oas 2008, S. 8, Abb. 1)

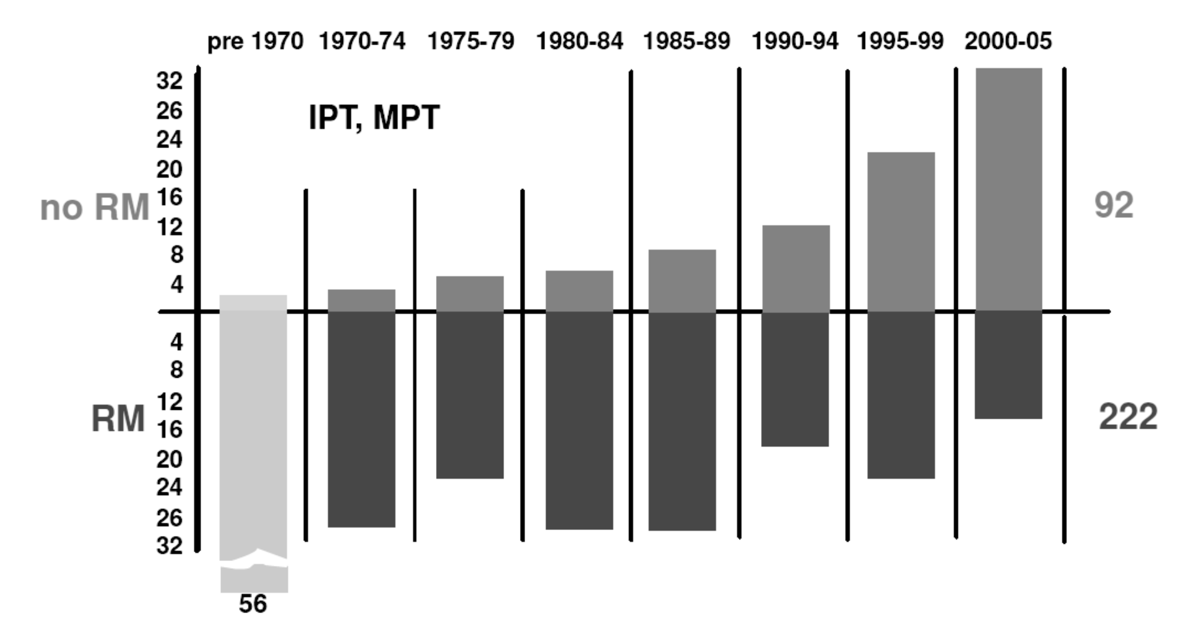


Abbildung 3.2: Einführungslehrbücher (IPT: Introductory Physics Textbooks) und Lehrbücher zur modernen Physik (MPT: Modern Physics Textbooks) mit (RM) und ohne (no RM) Einführung der relativistischen Masse, geordnet nach dem Erscheinungsjahr (Oas 2008, S. 8, Abb. 2)

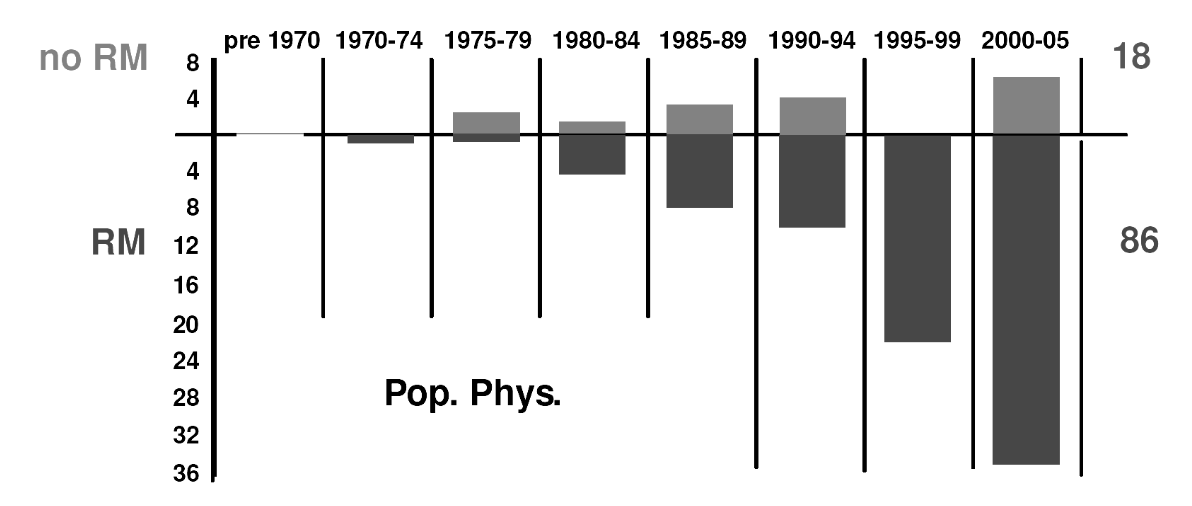


Abbildung 3.3: populärwissenschaftliche Bücher über Relativität und Physik (Pop. Phys.: Popularizations of Relativity and Physics) mit (RM) und ohne (no RM) Einführung der relativistischen Masse, geordnet nach dem Erscheinungsjahr (Oas 2008, S. 9, Abb. 3)

Die Abbildungen 3.1 bis 3.3 veranschaulichen die Ergebnisse der Literaturanalyse in Diagrammen, in denen, geordnet nach dem Erscheinungsjahr, die Anzahlen der von Oas gefundenen Werke ohne (no RM) und mit (RM) relativistischer Masse aufgetragen sind. Insgesamt zeigen die Daten bei den Lehrbüchern zur Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie ((a), siehe Abbildung 3.1, S. 91) sowie bei den Einführungslehrbüchern und Lehrbüchern zur modernen Physik ((b), siehe Abbildung 3.2, S. 91), dass sowohl Ansatz 1 mit relativistischer Masse, als auch Ansatz 2 ohne relativistische Masse in der physikalischen Fachliteratur verwendet wird. Im Bereich der Einführungslehrbücher und Lehrbücher zur modernen Physik ((b), siehe Abbildung 3.2, S. 91) lässt sich zusätzlich ein Trend zur Verwendung der Masse als invariante (nicht geschwindigkeitsabhängige) Größe beobachten. Dies zeigt sich zum einen daran, dass die Anzahl der Lehrbücher ohne Einführung der relativistischen Masse (no RM) mit dem Erscheinungsjahr zunimmt. Daneben verschiebt sich tendenziell auch das Verhältnis der Zahl der Werke mit bzw. ohne relativistische Masse zugunsten eines Verzichtes auf das Konzept der relativistischen Masse. Für populärwissenschaftliche Bücher über Relativität und Physik ((c), siehe Abbildung 3.3) zeigt sich im Kontrast dazu, dass die Idee einer geschwindigkeitsabhängigen Masse sehr häufig verwendet wird.

Die Tatsache, dass in Bezug auf die Masse zwei unterschiedliche Konzepte in der Physik Anwendung finden, gibt Anlass dazu, die beiden Ansätze 1 und 2 genauer zu betrachten. Hierzu werden diese Ansätze in den nächsten beiden Abschnitten hinsichtlich wesentlicher Aspekte und Unterschiede einzeln erläutert.

[1]Gemeint ist der Impuls p eines Körpers.

Ansatz 1 (Pro m(v)): Die Masse eines Objektes ist relativ

In diesem Ansatz wird die Masse

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \tag{3.1}$$

mit $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}}$:

$$m(v) = \gamma m_o \tag{3.2}$$

eines bewegten Objektes als bezugssystemabhängige Größe verstanden und von der Ruhemasse m_0 dieses Objektes unterschieden. Der Idee, dass die Masse abhängig von der Geschwindigkeit ist, wird beispielsweise die folgende anschauliche Überlegung zugrunde gelegt (vgl. z. B. Beyvers und Krusch 2009, S. 54-56):

Betrachtet wird die in Abbildung 3.4 (S. 94) dargestellte Situation. Ein Körper wird mit konstantem Geschwindigkeitsbetrag v ($v \ll c$, gemessen im Ruhesystem I der Mauer) senkrecht auf eine Mauer geschossen. Beim Aufprall auf die Mauer wird der Körper entsprechend seiner Masse m und seines Geschwindigkeitsbetrags v eine Vertiefung in der Mauer verursachen. Die Tiefe dieser Einschlagstelle ist damit ein Maß für den Betrag p des Impulses des Körpers und umso ausgeprägter, je höher die Geschwindigkeit oder die Masse des Körpers sind. Im Ruhesystem I der Mauer gilt somit (s: Abstand des Körpers bis zur Mauer zum Zeitpunkt $t = 0$, t: vergangene Zeit bis zum Einschlag in der Mauer):

$$p = mv = m\frac{s}{t} \tag{3.3}$$

Ein Beobachter (im System I'), der sich in einer Rakete senkrecht zur Bewegungsrichtung des Körpers mit konstantem Geschwindigkeitsbetrag u relativ zur Mauer bewegt, ermittelt aufgrund der Zeitdilatation $t' = \gamma t$ (mit $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{u}{c}\right)^2}}$) eine kleinere Geschwindigkeit v' des Geschosses. Da senkrecht zur Bewegungsrichtung der Rakete keine Längenkontraktion stattfindet, misst der Beobachter in der Rakete im System I' den gleichen Abstand des Körpers von der Mauer (zu Beginn), wie ein Beobachter in I. Somit gilt $s' = s$. Dementsprechend ermittelt der Beobachter in der Rakete als Betrag p' des Impulses:

$$p' = m'v' = m'\frac{s'}{t'} = m'\frac{s}{\gamma t} \tag{3.4}$$

Da sowohl ein Beobachter, der in I ruht, als auch der Beobachter in der Rakete (I') die gleiche Eindringtiefe des Körpers in der Wand bestimmen[2] (keine Längenkontraktion entlang der Richtung der Wandtiefe), muss für die Beträge der Impulse gelten:

$$p' = p \tag{3.5}$$

$$m'\frac{s}{\gamma t} = m\frac{s}{t} \tag{3.6}$$

$$\Rightarrow m' = \gamma m \tag{3.7}$$

[2] Da Ereignisse auch in der Relativitätstheorie nicht abhängig vom Bezugssystem sind, muss die „Beschädigung" der Wand für beide Beobachter identisch sein.

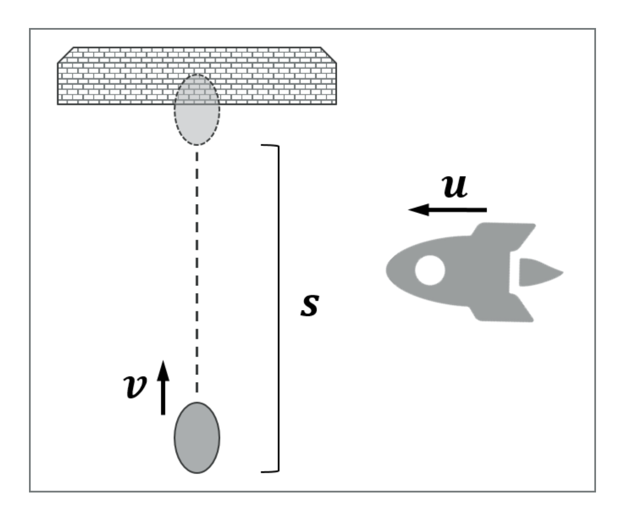


Abbildung 3.4: Begründung der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse $m(v)$

Das heißt, die Masse m' wächst mit dem Betrag u der Geschwindigkeit des Beobachters in der Rakete und ist damit relativ, also bezugssystemabhängig. Diese anschauliche Begründung dient allerdings eher dazu, die Relativität der Masse plausibel zu erklären und stellt keine logisch strenge Ableitung einer Geschwindigkeitsabhängigkeit dar.

In dem Fall wäre der vorausgesetzte Zusammenhang für den Impuls eines Körpers $\mathbf{p}_{Newton} = m\mathbf{v}$ problematisch, da diese Beziehung in der Newtonschen Mechanik gilt, während in der Speziellen Relativitätstheorie für den Impuls $\mathbf{p} = \gamma m\mathbf{v}$ (bzw. $\mathbf{p} = \gamma m_0\mathbf{v}$) gelten muss. Um analog zur Newtonschen Physik den Impuls weiterhin als Produkt aus Masse und Geschwindigkeit eines Körpers bestimmen zu können, wird die sogenannte *relativistische Masse* m_r definiert, um auch in der Speziellen Relativitätstheorie den Impuls in „gewohnter Weise" formulieren zu können:

$$m_r \equiv \gamma m_0 \tag{3.8}$$

$$\mathbf{p} = \gamma m_0\mathbf{v} \Leftrightarrow \mathbf{p} = m_r\mathbf{v} \tag{3.9}$$

Synonym zum Ausdruck für die relativistische Masse werden mitunter auch die Begriffe „bewegte Masse", „dynamische Masse" oder „Impulsmasse" verwendet.

Indem man an klassischen (newtonschen) Vorstellungen anknüpft, kann die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse auch in folgender Weise begründet werden (vgl. Grehn und Krause 2007, S. 366): Durch die beständige Zufuhr an Energie kann ein Körper beschleunigt werden, wodurch sich sein Impuls immer weiter erhöht. Da der Impuls nun bei konstanter Energiezufuhr beliebig anwächst, die Lichtgeschwindigkeit allerdings eine Geschwindigkeitsobergrenze für alle Körper darstellt, so dass die Geschwindigkeit des Körpers nicht beliebig vergrößert werden kann, muss die Energiezufuhr zu einer Erhöhung der Masse beitragen. Damit muss sich mit der Geschwindigkeit eines Objektes auch seine Masse erhöhen. In diesem Erklärungsansatz inbegriffen ist die Idee, die zugeführte Energie würde aufgrund der Äquivalenz von Masse und Energie ($E = m_r c^2$) in Masse „umgewandelt" werden.

Dabei unterscheidet sich je nach Massekonzept auch, wie genau die Gleichung zur Äquivalenz von Masse und Energie notiert und interpretiert wird (vgl. Okun 1989a, S. 31 f.). Relativistisch gilt für die Gesamtenergie E:

$$E = \gamma m_0 c^2 \tag{3.10}$$

Mit der relativistischen Masse (3.8) ergibt sich:

$$E = m_r c^2 \tag{3.11}$$

In dieser Notation ist die relativistische Masse abhängig von der Energie. Da diese wiederum eine bezugssystemabhängige Größe ist, muss auch die relativistische Masse bezugssystemabhängig sein (vgl. ebd.).

Mit diesem Ansatz kann argumentiert werden, dass die (relativistische) Masse eines Protons in einem Teilchenbeschleuniger bei Erhöhung der Geschwindigkeit des Protons anwächst. Da sich mit der Geschwindigkeitserhöhung auch die Energie E des Protons vergrößert, steigt nach Gleichung (3.11) auch die relativistische Masse des Protons an.

Eine weitere Konsequenz ist, dass Objekten ohne Ruhemasse ($m_0 = 0$) gemäß dieser Interpretation eine Masse zugeordnet werden kann. Hierzu wird gemäß (3.11) Photonen eine (relativistische) Masse mithilfe von (3.12) zugeschrieben, da Photonen eine bestimmte Energie besitzen. Demnach ist die relativistische Masse eines Photons durch seine Energie E gegeben:

$$m_r = \frac{E}{c^2} \tag{3.12}$$

Auch die Masse M eines Systems aus n Teilchen kann mithilfe der relativistischen Massen $m_{r,i}$ der das System konstituierenden Teilchen (mit den jeweiligen Energien E_i) einfach bestimmt werden (vgl. Sandin 1991, S. 1032):

$$M = \frac{E_{System}}{c^2} = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n} E_i}{c^2} = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{E_i}{c^2} \right) \tag{3.13}$$

$$= \sum_{i=1}^{n} m_{r,i} \tag{3.14}$$

Das heißt, die Systemmasse M entspricht der Summe der relativistischen Massen $m_{r,i}$ seiner Bestandteile, sie ergibt sich <u>nicht</u> aus der Summe der Ruhemassen $m_{0,i}$ der Teilchen. Ein Merkmal des Ansatzes 1 ist also die Additivität der (relativistischen) Masse. Betrachtet man zum Beispiel ein Gas, das in einem Ballon (die Masse des Ballons wird vernachlässigt) eingeschlossen ist, ergibt sich die Gesamtmasse des Gases schlicht aus den relativistischen Massen der Gasteilchen. Wird die Temperatur des Gases durch Wärmezufuhr vergrößert ($\Delta E = Q$), erhöht sich in Folge dieser Energiezufuhr auch die Gesamtmasse des Gases. Die höhere Gastemperatur manifestiert sich auf Teilchenebene in höheren kinetischen Energien der Gasteilchen, die sich mit erhöhten Geschwindigkeiten bewegen. Diese Geschwindigkeitserhöhung führt zum Anwachsen der relativistischen Massen der Teilchen und mündet dadurch auch insgesamt in einer Vergrößerung der Masse des Gases.

Einige weitere spezifische Aspekte des Ansatzes 1 werden in Kapitel 3.1.2 (ab S. 101) diskutiert. Den grundlegenden Ideen dieses Ansatzes werden nun die entsprechenden Kernaussagen des Ansatzes 2 gegenübergestellt.

Ansatz 2 (Anti m(v)): Die Masse eines Objektes ist invariant

In Ansatz 2 wird die Masse m eines Objektes als geschwindigkeitsunabhängige Größe behandelt. Die Unterscheidung zweier Massen $m(v) = m_r$ und m_0 entfällt damit, da die Masse als invariante Größe stets denselben Wert in allen Inertialsystemen besitzt, so dass nur eine einzige Masse m betrachtet wird.

Im Prinzip basiert dieser Ansatz auf der von Minkowski 1908 entwickelten Formulierung der Speziellen Relativitätstheorie mithilfe von Vierervektoren. Grundgedanke ist dabei, dass gemäß dem Einsteinschen Relativitätsprinzip kein Inertialsystem ausgezeichnet ist (1. Postulat). Mathematisch spiegelt sich diese Gleichberechtigung aller Inertialsysteme darin wider, dass die Gleichungen physikalischer Gesetze in beliebigen Inertialsystemen immer die gleiche Form besitzen. Um diese Bedingung zu erfüllen, müssen die Gesetze kovariant sein, das heißt, sie behalten unter Lorentz-Transformationen stets ihre mathematische Form (Forminvarianz). Dies gilt wiederum genau dann, wenn die Gleichungen der physikalischen Gesetze mit Vierer-Tensoren (der gleichen Stufe) formuliert werden (vgl. Nolting 2016, S. 36). Hierzu werden Ereignisse im vierdimensionalen Minkowski-Raum durch Vierervektoren (Tensor erster Stufe) beschrieben:

$$X^\mu \equiv \begin{pmatrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ct \\ \mathbf{x} \end{pmatrix} \tag{3.15}$$

Soll nun der Impuls als Vierervektor definiert werden, muss folgende Problematik berücksichtigt werden: In der Newtonschen Mechanik ist der Impuls definiert als

$$\mathbf{p}_{Newton} = m\mathbf{v} = m\frac{d\mathbf{x}}{dt} \tag{3.16}$$

In der Speziellen Relativitätstheorie würde diese Definition allerdings dazu führen, dass der Impulserhaltungssatz nicht gilt, da (3.16) vom Bezugssystem abhängig ist (vgl. Tipler und Llewellyn 2010, S. 81; Griffiths 1996, S. 97). Da dieses Problem durch die Geschwindigkeit $\frac{d\mathbf{x}}{dt}$ in (3.16) entsteht, ist es sinnvoll, eine geeignete Vierer-Geschwindigkeit u^μ zu definieren. Dabei zeigt sich, dass

$$\frac{dX^\mu}{dt} \tag{3.17}$$

als „naheliegender Kandidat“ für die Vierer-Geschwindigkeit nicht die nötigen Transformationseigenschaften für einen Vierervektor aufweist (vgl. Bartelmann et al. 2015, S. 342). Dies kann gelöst werden, indem man nach der Eigenzeit τ an Stelle der Zeit t differenziert und als Vierer-Geschwindigkeit u^μ definiert:

$$u^\mu \equiv \frac{dX^\mu}{d\tau} \tag{3.18}$$

Damit folgt für die Vierer-Geschwindigkeit unter Berücksichtigung der Zeitdilatation $dt = \gamma d\tau$ (vgl. ebd.):

$$u^\mu = \frac{dX^\mu}{d\tau} = \frac{dX^\mu}{dt}\frac{dt}{d\tau} = \gamma\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} ct \\ \mathbf{x} \end{pmatrix} = \gamma\begin{pmatrix} c \\ \mathbf{v} \end{pmatrix} \tag{3.19}$$

Nun kann auch der Impuls-Vierervektor P^μ durch

$$P^\mu \equiv mu^\mu \tag{3.20}$$

definiert werden, so dass der Impulserhaltungssatz lorentzinvariant ist, das heißt ohne Widerspruch zum Relativitätsprinzip erfüllt werden kann (vgl. Griffiths 1996, S. 97). Setzt man (3.19) in (3.20) ein, ergibt sich für den Vierer-Impuls

$$P^\mu = m\gamma\begin{pmatrix} c \\ \mathbf{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m\gamma c \\ \mathbf{p} \end{pmatrix} \tag{3.21}$$

mit

$$\mathbf{p} = m\gamma\mathbf{v} \tag{3.22}$$

$$\mathbf{p} = \gamma\mathbf{p}_{Newton} \tag{3.23}$$

Ersetzt man in (3.21) die Zeitkomponente (0. Komponente eines Vierervektors) mit

$$E = m\gamma c^2 \tag{3.24}$$

durch die Energie E, kann der Impuls-Vierervektor wie folgt geschrieben werden:

$$P^\mu = \begin{pmatrix} \frac{E}{c} \\ \mathbf{p} \end{pmatrix} \tag{3.25}$$

Da in dieser Schreibweise die Energie als Zeitkomponente des Impuls-Vierervektors auftaucht, wird P^μ auch als „Energie-Impuls-Vierervektor“ bezeichnet.

Die Bedeutung der Masse in diesem Ansatz wird nun klar, wenn man das Skalarprodukt des Vierer-Impulses bildet:

$$P^\mu P_\mu = \begin{pmatrix} \frac{E}{c} \\ \mathbf{p} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \frac{E}{c} \\ -\mathbf{p} \end{pmatrix} = \left(\frac{E}{c}\right)^2 - \mathbf{p}^2 \tag{3.26}$$

Da das Skalarprodukt zweier Vierervektoren eine skalare, invariante (invariant unter Lorentztransformation) Größe liefert (vgl. z. B. Nolting 2016, S. 41), hat $P^\mu P_\mu$ in jedem Bezugssystem denselben Wert. Betrachtet man ein Inertialsystem, in dem $\mathbf{p} = 0$ (Ruhesystem) gilt, ergibt sich mit der Ruheenergie E_0 und (3.24) ($\gamma = 1$ für $v = 0$):

$$P^\mu P_\mu = \left(\frac{E_0}{c}\right)^2 = (mc)^2 \tag{3.27}$$

Aufgrund der Lorentzinvarianz des Skalarproduktes hat $P^{\mu}P_{\mu}$ in jedem Inertialsystem denselben Wert $(mc)^2$ (siehe (3.27)), so dass sich mit (3.26) und (3.27) für den Zusammenhang zwischen Energie, Impuls und Masse Gleichung (3.28) ergibt:

$$\left(\frac{E}{c}\right)^2 - \mathbf{p}^2 = (mc)^2 \tag{3.28}$$

$$\Leftrightarrow E^2 - (\mathbf{p}c)^2 = \left(mc^2\right)^2 \tag{3.29}$$

Somit entspricht die Masse der Norm (dem „Betrag“, der „Länge“) des Impuls-Vierervektors und ist als solche eine invariante skalare Größe. Die Masse m ist deshalb nicht abhängig von der Geschwindigkeit eines Objektes und besitzt in jedem Inertialsystem denselben Wert. Darum wird in Ansatz 2 begrifflich nicht zwischen der „Ruhemasse“ m_0 und einer „bewegten Masse“ (beobachtet in einem vom Ruhesystem verschiedenen Inertialsystem) differenziert. Stattdessen wird ausschließlich der Begriff „Masse“ für m verwendet, da der Begriff „Ruhemasse“ seine Bedeutung verliert und irreführend ist, wenn ein bewegtes Objekt betrachtet wird (vgl. Taylor und Wheeler 1992, S. 251). Für ein einzelnes Teilchen ist die invariante Masse m aber prinzipiell die Ruhemasse, wie sie in Ansatz 1 verwendet wird ($m = m_0$).

Aus (3.29) folgt für mitbewegte Beobachter im Ruhesystem eines Objektes ($\mathbf{p} = 0$):

$$E_0 = mc^2 \tag{3.30}$$

Das bedeutet, die Masse eines Objektes entspricht seiner Ruheenergie. Da die Ruheenergie eine Größe ist, über die beliebige Beobachter verschiedener Bezugssysteme übereinstimmen, ist auch anhand der Gleichung (3.30) für die Äquivalenz von Masse und Energie (genauer: Ruheenergie) schlüssig, dass ebenso die Masse unabhängig vom gewählten Bezugssystem ist. Auch Einstein formulierte die Masse-Energie-Äquivalenz im Grunde gemäß (3.30) und bezog die Energie auf das Ruhesystem des jeweiligen Objektes. Entgegen der häufigen Ansicht, Einstein hätte seine berühmte Gleichung in Form und Bedeutung mit $E = mc^2$ angegeben, wobei m eine geschwindigkeitsabhängige Masse und E die Gesamtenergie wäre, trifft dies jedoch nicht zu (vgl. Hecht 2011a, S. 591), wie das folgende Beispiel zeigt:

> Wendet man ferner die letzte der Gleichungen (43) auf einen ruhenden Massepunkt an ($q = 0$), so sieht man, *daß die Energie E_0 eines ruhenden Körpers seiner Masse gleich ist* [Hervorhebung im Original]. Bei Wahl der Sekunde als Zeiteinheit würde sich
>
> $$E_0 = mc^2 \quad (44)$$
>
> ergeben haben. Masse und Energie sind also wesensgleich, d. h. nur verschiedene Äußerungsformen derselben Sache. Die Masse eines Körpers ist keine Konstante sondern mit dessen Energieänderungen veränderlich. (Einstein 2002, S. 49)

Einstein meint im letzten Satz jedoch nicht, dass die Masse sich mit der Geschwindigkeit eines Körpers ändern kann, sondern dass sich die Masse eines Objektes verändert, wenn dessen Ruheenergie verändert wird. Absorbiert beispielsweise ein Atom ein Photon, vergrößert sich nach (3.30) die Masse dieses Atoms um $\frac{E_{Photon}}{c^2}$, da seine Ruheenergie um die Energiemenge des Photons wächst.

Wird wiederum einem Proton in einem Teilchenbeschleuniger kinetische Energie zugeführt, indem es auf immer höhere Geschwindigkeiten beschleunigt wird, verändert sich dadurch nicht die Ruheenergie E_0 des Protons und somit auch nicht dessen Masse. Lediglich die Gesamtenergie

$$E = m\gamma c^2 = E_0 + E_{kin} \tag{3.31}$$

des Teilchens vergrößert sich durch die anwachsende kinetische Energie E_{kin} des Protons im Beschleuniger, während seine Masse unverändert bleibt, da eben nicht die Ruheenergie E_0 des Protons erhöht wird (vgl. Manor 2015, S. 1407).

Einem Photon wird in Ansatz 2 (ohne relativistische Masse) keine Masse zugeschrieben. Da sich Photonen mit Lichtgeschwindigkeit bewegen und in der Speziellen Relativitätstheorie postuliert wird, dass die Geschwindigkeit des Lichts in allen Bezugssystemen gleich groß ist (2. Postulat zur Invarianz der Lichtgeschwindigkeit), existiert für Photonen kein Ruhesystem. Demzufolge besitzen Photonen ausschließlich kinetische Energie, aber keine Ruhenergie (vgl. Okun 1989a, S. 32). Deshalb ergibt sich entsprechend Gleichung (3.30), dass Photonen wegen $E_0 = 0$ keine Masse ($m = 0$) besitzen.

Bei einem System aus n Teilchen bestimmen sowohl die (Ruhe-)Massen m_i der Systembestandteile als auch deren kinetische Energien $E_{kin,i}$ die Masse M des Systems (vgl. z. B. Taylor und Wheeler 1992, S. 247 f.). Diese ist nach (3.30) proportional zur Ruheenergie $E_{0,System}$ des Teilchensystems, so dass analog zu (3.13) festgehalten werden kann:

$$M = \frac{E_{0,System}}{c^2} = \frac{\sum_{i=1}^{n} E_i}{c^2} = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{E_i}{c^2}\right) \tag{3.32}$$

Die Energie E_i jedes Teilchens des Systems setzt sich zusammen aus dessen Ruheenergie $E_{0,i}$ und der jeweiligen kinetischen Energie $E_{kin,i}$ (Kräfte zwischen den Teilchen sollen hier vernachlässigt werden, so dass keine potenziellen Energien berücksichtigt werden):

$$E_i = E_{0,i} + E_{kin,i} \tag{3.33}$$

Dementsprechend ergibt sich für die Masse des Systems mit (3.32):

$$M = \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{E_{0,i}}{c^2} + \frac{E_{kin,i}}{c^2}\right) \tag{3.34}$$

$$= \sum_{i=1}^{n} m_i + \sum_{i=1}^{n}\left(\frac{E_{kin,i}}{c^2}\right) \tag{3.35}$$

Die Masse eines Systems entspricht somit im Allgemeinen <u>nicht</u> der Summe der (Ruhe-)Massen seiner Bestandteile. Insofern ist die Masse in Ansatz 2 nicht additiv (vgl. Hecht 2011b, S. 41). Im Unterschied zu Ansatz 1, bei dem die relativistische Masse (wie die Gesamtenergie) im Prinzip eine Erhaltungsgröße ist, gilt dies nicht für die (Ruhe-)Masse in Ansatz 2 (vgl. Leong und Chin 2005, S. 62). Folgendes Beispiel aus Tipler und Llewellyn (2010, vgl. S. 107 f.) illustriert diesen Zusammenhang anschaulich:

Zwei Teilchen, jeweils mit einer Masse von $m = 4\,\text{kg}$, bewegen sich in ihrem Schwerpunktsystem mit einer Geschwindigkeit von $v = 0{,}6c$ geradlinig aufeinander zu. Die Berechnung der Energie E_T für jedes Teilchen im Schwerpunktsystem ergibt:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\left(\frac{0,6c}{c}\right)^2}} = 1{,}25$$

$$p_T = m\gamma v = 3\,\text{kg}c$$

$$E_T^2 = \left(mc^2\right)^2 + (pc)^2$$

$$E_T = \sqrt{(4\,\text{kg}c^2)^2 + (3\,\text{kg}cc)^2} = 5\,\text{kg}c^2$$

Damit lässt sich die Gesamtmasse M des Systems der beiden nicht miteinander wechselwirkenden Teilchen bestimmen:

$$M = \frac{E_{0,System}}{c^2} = \frac{2E_T}{c^2} = 10\,\text{kg}$$

Offensichtlich ist demnach die Gesamtmasse des Systems der beiden Teilchen mit 10 kg größer, als die Summe der Massen der einzelnen Teilchen ($2 \cdot 4\,\text{kg} = 8\,\text{kg}$).

Damit wird auch klar, dass sich die Masse eines in einem Ballon (dessen Masse vernachlässigt wird) eingeschlossenen Gases nicht allein durch Addition der Massen der Gasteilchen ergibt. Zusätzlich müssen deren kinetische Energien berücksichtigt werden, die einen Beitrag zur Gesamtmasse des Gases leisten. Führt man diesem Gas Wärme zu ($\Delta E = Q$), um die Temperatur zu erhöhen, vergrößern sich auch die kinetischen Energien der Teilchen. Diese Energieerhöhung bewirkt eine Vergrößerung der Gasmasse insgesamt, obwohl die einzelnen Massen der Gasteilchen konstant bleiben. Denkt man sich statt der Gasteilchen masselose Photonen, besitzt aufgrund der kinetischen Energien der Lichtquanten das System der Photonen als Ganzes dennoch eine von Null verschiedene Masse (vgl. Hecht 2011b, S. 41 f.).

Tabelle 3.2: Vergleich wesentlicher Aussagen der beiden Massekonzepte

Ansatz 1 (Pro $m(v)$)	**Ansatz 2** (Anti $m(v)$)
Masse ist bezugssystemabhängig. Sie wächst mit der Geschwindigkeit eines Objektes.	Masse ist invariant. Sie ist unabhängig von der Geschwindigkeit eines Objektes.
Es wird zwischen der Ruhemasse m_0 und der relativistischen Masse $m_r = \gamma m_0$ unterschieden.	Es gibt nur eine Masse m, die für alle Beobachter denselben Wert hat.
Zusammenhang zwischen Masse und Energie: $E = m_r c^2$ (E: Gesamtenergie)	Zusammenhang zwischen Masse und Energie: $E_0 = mc^2$ (E_0: Ruheenergie)
Photonen kann die Masse $\frac{E}{c^2}$ zugeordnet werden.	Photonen sind masselos.
Die Masse eines Systems entspricht der Summe der relativistischen Massen seiner Bestandteile.	Die Masse eines Systems entspricht im Allgemeinen nicht der Summe der Massen seiner Bestandteile.

Die beiden Ansätze 1 und 2 unterscheiden sich, wie beschrieben, grundlegend in wesentlichen Ideen und Kernaussagen. Tabelle 3.2 (S. 100) stellt einige wichtige Gesichtspunkte der beiden verschiedenen Ansätze zusammengefasst gegenüber. Die Diskussion über mögliche Vor- und Nachteile bzw. über die jeweilige Berechtigung der beiden Ansätze folgt im nächsten Kapitel.

3.1.2 Diskussionspunkte und Argumente der beiden Ansätze

In diesem Abschnitt wird dargestellt, welche fachlichen Diskussionspunkte unter Physikern in Bezug auf den Gebrauch des Begriffs der relativistischen Masse bestehen. Dabei sollen einige wesentliche Argumentationen im Diskurs um die Frage der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse in der Speziellen Relativitätstheorie beleuchtet werden. Zu berücksichtigen sind dabei die folgenden beiden Gesichtspunkte: Erstens ist die vorliegende Arbeit physikdidaktischer Natur. Das bedeutet, dass fachwissenschaftliche Argumente hier zum Teil nur skizziert werden können und sich auf besonders wichtige, grundsätzliche Aspekte der fachlichen Diskussion bezogen wird. Zentral ist insofern die kontrastierende Analyse der verschiedenen Argumentationslinien der beiden Fachpositionen, nicht aber die dezidierte fachwissenschaftliche Erörterung derselben. Für ein ausführliches Studium der physikalischen Details und inhaltlichen Feinheiten des Fachdiskurses muss auf die jeweils genannten Quellen verwiesen werden. Zweitens muss darauf aufmerksam gemacht werden, dass bei der Analyse und Darstellung kontroverser Themen die Forderung nach Neutralität wahrscheinlich prinzipiell nicht erfüllt werden kann, da durch die Auswahl und Darstellung von Inhalten eine subjektive Verzerrung nicht auszuschließen ist (vgl. Scott, Richards und Martin 1990, S. 474). Um diesem Problem zu begegnen, wurde sich um eine möglichst breite Sichtung der Literatur zum Themenschwerpunkt der relativistischen Masse bemüht. Nachfolgend werden einige der dabei identifizierten Diskussionspunkte zur Konsistenz, Relevanz, Verständlichkeit oder der Fachlogik in Bezug auf die Ansätze 1 und 2 erläutert.

(1) Konsistenz mit dem Vierervektor-Formalismus

Als einer der stärksten Gegner des Konzeptes der geschwindigkeitsabhängigen relativistischen Masse argumentiert Okun (1989a, vgl. S. 31 f.), die Masse sei in den Gleichungen der Speziellen Relativitätstheorie die gleiche, wie in der Newtonschen Mechanik. Ausgangspunkt seiner Überlegung sind dabei die aus dem Vierervektor-Formalismus leicht hervorgehenden Zusammenhänge für Masse, Impuls und Energie. Okun nutzt Gleichung (3.29) sowie den Zusammenhang

$$\mathbf{p} = \mathbf{v}\frac{E}{c^2},$$

der sich aus (3.22) und (3.24) ergibt. Weiter betrachtet er damit den Impuls und die Energie für den Grenzfall kleiner Geschwindigkeiten ($v \ll c$) (ebd. S. 32):

$$\mathbf{p} \simeq \mathbf{v}\frac{E_0}{c^2} = \mathbf{v}m$$

$$E = E_0 + E_{kin} = \sqrt{\mathbf{p}^2c^2 + m^2c^4} = mc^2 + \frac{\mathbf{p}^2}{2m} + \ldots$$

$$E_{kin} = \frac{\mathbf{p}^2}{2m}$$

Demnach ließen sich für den Bereich kleiner Geschwindigkeiten aus den Gleichungen der Relativitätstheorie die Beziehungen für Impuls und kinetische Energie, wie sie in der Newtonsche Mechanik gelten, ableiten (vgl. ebd.). Dadurch zeige sich, dass die Masse m sowohl in der Newtonschen Mechanik als auch in der Speziellen Relativitätstheorie die gleiche Bedeutung habe. Damit die beiden physikalischen Theorien miteinander korrespondieren (vgl. Okun 1989b, S. 631), müsse also die Masse in der Relativitätstheorie dieselbe sein, wie in der Newtonschen Mechanik (vgl. Okun 1989a, S. 32). Da in der Newtonschen Mechanik die Masse eine bezugssystemunabhängige Größe darstellt (vgl. Bickerstaff und Patsakos 1995, S. 63), ist es mit Okuns Argument logisch und konsistent, dass die Masse in der Relativitätstheorie ebenso eine Invariante ist.

Auch mithilfe des Vierervektor-Formalismus (siehe Kapitel 3.1.1, ab S. 87, Ansatz 2) ergibt sich die Masse als Norm des Vierer-Impulses (siehe auch Gleichung (3.29)) und somit als invariante Größe (vgl. z. B. Taylor und Wheeler 1992, S. 246; Bleck-Neuhaus 2013, S. 404). Da die Masse demnach ein Skalar ist, erschwere der Begriff einer geschwindigkeitsabhängigen Masse das Verständnis der Relativitätstheorie (vgl. Okun 2009, S. 430).

Vasiliev (2012, S. 139) kritisiert Okuns Argumentation, da dabei „a priori“ angenommen werden würde, dass die Masse ein Skalar sei. Hier sieht Vasiliev einen logischen Fehler, da man nicht von vornherein hiervon ausgehen könne. Ob die (relativistische) Masse wiederum eine skalare Größe sein müsse, könne sich schließlich nur in Verbindung mit der experimentellen Erfahrung zeigen. Annahmen der Newtonschen Mechanik, in der die Masse skalar ist, könnten nicht einfach auf den Gültigkeitsbereich der Relativitätstheorie erweitert werden (vgl. ebd. S. 137). Vasiliev selbst beschreibt die relativistische Masse als „relativistische Messung der Trägheit“ und gibt an, dass sie eine Komponente eines Vierervektors sei (0. Komponente des Vierer-Impulses in Gleichung (3.25) kann mit (3.11) durch m_r ausgedrückt werden). Dies sei grundlegend für die Gültigkeit von $E = mc^2$ für alle Geschwindigkeiten (vgl. ebd., S. 142). In diesem Diskussionspunkt zeigen sich insofern zwei unterschiedliche Auffassungen darüber, in welchem Verhältnis bzw. Zusammenhang die Newtonsche Mechanik und die Relativitätstheorie zueinander stehen (siehe auch Diskussionspunkt 3.1.2, S. 115).

(2) Analogiebetrachtung zur Relativität der Zeit

Sandin (1991, S. 1034) bezieht sich in ihrem Artikel zur Befürwortung des Konzepts der relativistischen Masse auf eine Kritik von Adler (1987), der den Standpunkt vertrete, die relativistische Masse sei nicht „real“. Dem hält Sandin entgegen, dass ein bewegter Beobachter für die Masse den Wert $m_r = \gamma m_0$ messe, was für diesen Beobachter insofern „real“ sei. Dies kön-

ne somit analog zur veränderten Zeit- bzw. Längenmessung in Abhängigkeit vom gewählten Bezugssystems betrachtet werden.

Die Analogie zur Zeitdilatation und Längenkontraktion nutzt auch Millette (2017). Während für verschiedene Beobachter im selben Ruhesystem Zeiten und Längen unveränderliche Größen sind, ändern sich diese bei der Beschreibung aus dazu bewegten Systemen. Die Relativität der Masse sei ein zur Zeitdilatation und Längenkontraktion ganz ähnlicher, „scheinbarer“ Effekt, der in bewegten Bezugssystemen auftrete (vgl. ebd., S. 203 f.). So gesehen sei die relativistische Masse keine einem Objekt an sich innewohnende Eigenschaft, sondern eine „effektive Masse“ und „represents a quantity of energy that behaves in dynamic equations similar to a mass“ (ebd., S. 204). Konkret entspräche die relativistische Masse der Messung der Gesamtenergie eines Objektes, je nach Beobachtung aus einem bestimmten Bezugssystem und damit in Abhängigkeit von der Relativgeschwindigkeit eines Beobachters. Für Millette erwächst der Nutzen des Konzeptes der relativistischen Masse aus dem Relativitätsprinzip. Da kein Bezugssystem ausgezeichnet ist, sei die Betrachtung einer geschwindigkeitsabhängigen Masse, welche die Bezugssystemabhängigkeit berücksichtigt, sinnvoll (vgl. ebd.).

Auch Petkov (2009, vgl. S. 115) formuliert aus dem Vergleich von $m_r = \gamma m_0$ und $t = \gamma\tau$ heraus ein Argument für die relativistische Masse. Dabei greift er eine Aussage von Taylor und Wheeler (1992, vgl. S. 250) auf, die zwischen der Ruhemasse als „Betrag“ (Norm) des Impuls-Vierervektors und der relativistischen Masse, die im Prinzip der Gesamtenergie und somit einer Komponente dieses Vierer-Impulses entspricht, unterscheiden (siehe Diskussionspunkt (3), S. 103). Wenn eine solche Abgrenzung zwischen relativistischer Masse und Ruhemasse gegen die Verwendung des Konzeptes der relativistischen Masse spräche, müsse derselben Logik folgend auch die „Koordinatenzeit“ t als obsolet erklärt werden und nur noch die Eigenzeit τ verwendet werden dürfen. Ebenso, wie zwar die Eigenzeit eine Invariante ist, während die Koordinatenzeit bezugssystemabhängig betrachtet werden muss, sei neben der invarianten Ruhemasse auch die relativistische Masse als bezugssystemabhängige Größe zu akzeptieren.

Der Vergleich zur Relativität der Zeit bringt Khrapko (2000, S. 1269) zu der Einschätzung:

> Transition from the rest mass to the relativistic one in the relativistic theory appears to encounter the same psychological problems as transition from proper to relative time.

(3) Relativistische Masse und Gesamtenergie

Anhand von Gleichung (3.11)

$$E = m_r c^2$$

wird deutlich, dass ein sehr enger Zusammenhang zwischen der relativistischen Masse und der Gesamtenergie besteht. Da die relativistische Masse eines Objektes (bis auf c^2) im Wesentlichen dessen Gesamtenergie entspricht, steht die Relevanz bzw. Notwendigkeit der relativistischen Masse in Frage (vgl. Okun 2000, S. 1272; Rafelski 2019, S. 251; Bickerstaff und Patsakos 1995, S. 64 f.; Greiner und Rafelski 1992, S. 85). Griffiths (1996, S. 99) betrachtet die relativistische Masse deshalb als „überflüssige Größe, die keinerlei nützliche Funktion besitzt“, da alle physikalischen Zusammenhänge und Aussagen zur relativistischen Masse ebenso

mit der Gesamtenergie ausgedrückt werden könnten. So würde beispielsweise die Additivität der relativistischen Masse (siehe Kapitel 3.1.1, ab S. 87, Ansatz 1) auf den Energieerhaltungssatz zurückgeführt werden können (vgl. ebd.). Weil man sich, so gesehen, stets direkt auf die Gesamtenergie beziehen kann, sei die relativistische Masse keine notwendige Größe (vgl. Fließbach 2018, S. 50; Bartelmann et al. 2015, S. 359).

Vasiliev (2012, vgl. S. 142) entgegnet dem Argument, dass die relativistische Masse im Prinzip der Gesamtenergie gleichkommen würde, dass auch die Ruhemasse lediglich der Ruheenergie entspräche. Insofern stellt sich die Frage, weshalb eine Trennung von Ruheenergie E_0 und Gesamtenergie E gerechtfertigt ist, während die Unterscheidung zwischen Ruhemasse m_0 und relativistischer Masse m_r es nicht ist. Eine Antwort gibt Okun (2000, vgl. S. 1271) vor dem Hintergrund der Zusammenhänge im Vierervektor-Formalismus: Da die Energie eine bezugssystemabhängige Größe ist, müsse die Ruheenergie als Spezialfall einer Betrachtung im Ruhesystem mit E_0 gegenüber der Energie E in einem beliebigen Bezugssystem unterschieden werden. Demgegenüber sei die Masse allerdings eine bezugssystemunabhängige Größe, so dass eine Abgrenzung zwischen der Masse im Ruhesystem und in einem bewegten System keinen Sinn ergäbe.

Aufgrund des Vergleichs zur Energie sei die relativistische Masse nicht fundamental, was sich auch daran zeige, dass die Masse zwar in der Gleichung für den Impuls ersetzt werden kann ($\mathbf{p} = m_r\mathbf{v}$), aber beispielsweise weder im Newtonschen Grundgesetz noch in der klassischen Gleichung für die kinetische Energie durch $m_r = \gamma m_0$ ersetzt werden könne (vgl. Whitaker 1976, S. 55, siehe auch Giancoli 2010, S. 1247):

$$\mathbf{F} \neq m_r\mathbf{a}$$
$$E_{kin} \neq \frac{1}{2}m_r\mathbf{v}^2$$

Dieses Argument sei nach Sandin (1991, vgl. S. 1034) nicht stichhaltig, da man die Masse in diesen beiden Gleichungen der Newtonschen Mechanik ebenso wenig durch die invariante Masse m ersetzen könne:

$$\mathbf{F} \neq m\mathbf{a}$$
$$E_{kin} \neq \frac{1}{2}m\mathbf{v}^2$$

Vielmehr sei es schlicht so, dass diese beiden klassischen Gleichungen nicht in der Form im Bereich der relativistischen Physik gültig sind.

Bickerstaff und Patsakos (1995, vgl. S. 65) sowie Okun (1989b, vgl. S. 629) stellen im Sinne einer fehlenden Relevanz der relativistischen Masse heraus, dass eine wesentliche Erkenntnis der Relativitätstheorie in $E_0 = mc^2$ (mit m als „Ruhemasse") stecke, nicht aber in $E = m_r c^2$. Der Zusammenhang zwischen Ruheenergie und Masse ($E_0 = mc^2$) „tells us that the previously known entity, Newtonian mass, is to be interpreted as a form of energy" (Bickerstaff und Patsakos 1995, S. 65). Die Gleichung $E_0 = mc^2$ enthielte die schwerwiegende und grundlegend neue Idee, dass jedem Körper schon an sich eine ihm innewohnende Energie (die Ruheenergie) zugeordnet werden kann, die seiner (Ruhe-)Masse entspricht (vgl. ebd.; Okun 1989b, S. 634). Demgegenüber habe die relativistische Masse „a much more subordinate status than

it enjoys“ (Brehme 1968, S. 899). Diese Einschätzung der Bedeutung der relativistischen Masse teilt auch Adler (1987) und empfiehlt Lehrenden, die dennoch nicht auf die Begrifflichkeit der relativistischen Masse verzichten wollen:

> [...] its status as a „convenience“ should be made clear and it should not be presentet as, in any sense, fundamental to the special theory of relativity. (ebd., S. 743)

Die (Ruhe-)Masse hingegen unterscheidet sich nach Taylor und Wheeler (1992, vgl. S. 250) - im Gegensatz zur relativistischen Masse - grundlegend von der Energie. Während die (Ruhe-)Masse der Norm des Impuls-Vierervektors entspricht, ist die Energie als Komponente dieses Vierervektors ein schon mathematisch gänzlich verschiedenes Objekt. Allein im Ruhesystem eines Objektes gleicht die (Ruhe-)Masse der Energie des Objektes (bis auf c^2). Grundsätzlich ist die (Ruhe-)Masse allerdings invariant, wohingegen die Energie bezugssystemabhängig ist (vgl. Okun 1989a, S. 32). Deshalb kritisieren Taylor und Wheeler (1992, S. 250 f.) den Begriff der relativistischen Masse:

> The concept of „relativistic mass“ is subject to misunderstanding. That‘s why we don‘t use it. First, it applies the name mass - belonging to the magnitude of a 4-vector - to a very different concept, the time component of a 4-vector. Second, it makes increase of energy of an object with velocity or momentum appear to be connected with some change in internal structure of the object. In reality, the increase of energy with velocity originates not in the object but in the geometric properties of spacetime itself.

Dementsprechend schlagen Taylor und Wheeler vor, ausschließlich von der „Masse“ zu sprechen und weder den Begriff „relativistische Masse“, noch den der „Ruhemasse“ zu verwenden (vgl. ebd., S. 251). Auch Kolbenstvedt und Stølevik (1991, vgl. S. 828) schlagen deshalb vor, auf m_0 und $m_r = \gamma m_0$ zu Gunsten einer Masse m zu verzichten.

(4) Masse als charakteristische Teilcheneigenschaft

Ein Teilchen kann mithilfe seiner (Ruhe-)Masse charakterisiert werden (vgl. Okun 1989b, S. 634; Kobel et al. 2018, S. 10; Bartelmann et al. 2015, S. 356), so dass der Masse eine wichtige Bedeutung bei der physikalischen Beschreibung der Welt beigemessen werden kann: „The mass (in the standard model) is a fundamental descriptor of a particle“ (Aubrecht 2004, S. 970). Anhand der (Ruhe-)Masse eines Teilchens gelingt dessen Identifikation (vgl. Strnad 1991, S. 71). Um erkennen zu können, um was für ein Teilchen es sich handelt, ist die Masse eine entscheidende Größe, die zum Beispiel ähnlich wie die elektrische Ladung eine definierende Eigenschaft eines Teilchens ist (vgl. Fließbach 2018, S. 24). Als ein solches fundamentales Merkmal eines jeden Teilchens, sollte die Masse keine mit der Geschwindigkeit veränderliche und somit vom Bezugssystem abhängige Eigenschaft sein (vgl. ebd.; Kobel et al. 2018, S. 10). Da die relativistische Masse eines Teilchens in verschiedenen Bezugssystemen aber unterschiedliche Werte annimmt, könnte sie dem Anspruch (wie er oben formuliert wurde) an ein Konzept von Masse als unabhängige, eindeutige und somit charakteristische Eigenschaft eines Teilchens nur schwerlich gerecht werden.

(5) Anwendung nichtrelativistischer Gleichungen

Aus den vorangehenden Diskussionspunkten erwächst zum Teil die Frage nach der Bedeutung oder Relevanz des Begriffs der relativistischen Masse. Eine mögliche Antwort gibt Rindler (1990, S. 143), der die Verwendung der relativistischen Masse befürwortet:

> To me, $m = \gamma m_0$ is a useful heuristic concept. It gives me a feeling for the magnitude of the momentum $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ at various speeds. The formula $E = mc^2$ reminds me that energy has mass-like properties such as inertia and gravity, and it tells me how energy varies with speed.

Während Ungar (2011, vgl. S. 47) Rindler in seiner Ansicht zustimmt und die relativistische Masse in dem Sinne ebenfalls als nützlich erachtet, stößt diese Position beispielsweise bei Okun (1989a, vgl. S. 33) auf Kritik: Grundlage der Idee einer geschwindigkeitsabhängigen relativistischen Masse sei die Verwendung nichtrelativistischer Gleichungen, insbesondere $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$, die in der Speziellen Relativitätstheorie jedoch nicht angewendet werden dürften. Tatsächlich könnte Rindler die Übertragung klassischer (newtonscher) Vorstellungen ($\mathbf{p} = m\mathbf{v}$) auf den relativistischen Bereich meinen, wenn er von einem (klassischen) „Gefühl" für die Größe des Impulses spricht. Okun (1998, vgl. S. 405) betrachtet gerade die Verwendung von $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ als Hauptursache für die Unklarheiten in Bezug auf die Masse in der Relativitätstheorie. Damit entstehe der Eindruck, die Masse würde von der Geschwindigkeit eines Objektes mitbestimmt. Auch historisch gesehen führt Okun (1989b, vgl. S. 629) die Entstehung des Konzeptes der relativistischen Masse Anfang des 20. Jahrhunderts auf die Entlehnung der Impulsdefinition der Newtonschen Mechanik hinein in die Relativitätstheorie zurück, in der $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ allerdings nicht gültig ist. Der Ausdruck $m_r = \gamma m_0$ für die relativistische Masse sei somit nur aus „psychologischen Gründen" eingeführt worden und heute ein „obsoletes und essentiell inadäquates", „archaisches" Konzept (Okun 1987, S. 12).

Auch Embacher (2010, vgl. S. 206) und Aubrecht (2004) bemängeln das Konzept der relativistischen Masse wegen einer unrechtmäßigen Anwendung bzw. Kombination relativistischer und nichtrelativistischer Gleichungen, wobei nur $\mathbf{p} = m\gamma\mathbf{v}$ auch für relativistische Geschwindigkeiten gilt. Die Anwendung der klassischen Beziehung $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ steht in der Relativitätstheorie im Widerspruch zum Impulserhaltungssatz, so dass statt der „herkömmlichen" Geschwindigkeit die Vierer-Geschwindigkeit u^μ in der Relativitätstheorie genutzt werden muss, womit sich $\mathbf{p} = m\gamma\mathbf{v}$ ergibt (vgl. Griffiths 1996, S. 97; Bartelmann et al. 2015, S. 342).

Da die Nutzung der relativistischen Masse m_r in $\mathbf{p} = m_r\mathbf{v}$ im Endeffekt aber auch zu richtigen Berechnungen führt, weil nicht die Newtonsche Masse, sondern $m_r = \gamma m_0$ in der Impulsdefinition eingesetzt wird, könnte man die Kritik als „akademisches Geplänkel abtun" (Fließbach 2018, S. 50). Die Nützlichkeit der relativistischen Masse könnte wiederum darin liegen, dass sie einen Übergang von der Newtonschen Mechanik hin zur Relativitätstheorie möglich macht (vgl. ebd., S. 49). Hier taucht also im Sinne Rindlers (siehe oben) die Frage auf, ob die relativistische Masse eine geeignete Heuristik im Bereich der Speziellen Relativitätstheorie bietet. Oas (2008, vgl. S. 4) betrachtet ein solches Vorgehen jedoch als fragwürdig, da die geschwindigkeitsabhängige Masse m_r nicht mit dem Vierervektor-Formalismus konsistent sei. Die heuristische Verwendung der relativistischen Masse sei vergleichbar damit, die Zentrifugalkraft als Erklärung dafür zu nutzen, dass es „scheinbar" eine Kraftwirkung auf Körper im

beschleunigten Bezugssystem gäbe, ohne dabei auf die Unterschiede zwischen beschleunigtem Bezugssystem und Inertialsystem einzugehen.

(6) Kinematischer Ursprung des Lorentz-Faktors

Ein weiterer Diskussionspunkt im Zusammenhang mit der Gleichung für den Impuls $\mathbf{p} = m\gamma\mathbf{v}$ (bzw. $\mathbf{p} = \gamma m_0\mathbf{v}$) ist die Frage nach der Herkunft des Lorentz-Faktors γ und der damit einhergehenden Verknüpfung mit der (Ruhe-)Masse (m bzw. m_0) oder der Geschwindigkeit $\mathbf{v}$. Oas (2008, vgl. S. 4) und Strnad (1991, vgl. S. 72) halten fest, dass der Faktor γ seinen Ursprung in kinematischen Betrachtungen findet und in Bezug auf den Impuls $\mathbf{p} = m\gamma\mathbf{v}$ nicht mit dynamischen Aspekten verknüpft sei. Auch Boblest, Müller und Wunner (2016, vgl. S. 93) geben an, dass γ in der Konzeption des Vierervektor-Formalismus mit der Vierer-Geschwindigkeit verbunden sei und nicht mit der Masse in Verbindung stehe. Demnach (siehe Kapitel 3.1.1, ab S. 87, Ansatz 2) ist γ in Gleichung (3.21) mit der Vierer-Geschwindigkeit u^μ assoziiert und gelangt im Prinzip aufgrund der Zeitdilatation in die Impulsdefinition:

$$P^\mu = m \cdot u^\mu = m \cdot \gamma \begin{pmatrix} c \\ \mathbf{v} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m\gamma c \\ \mathbf{p} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{p} = m \cdot \gamma\mathbf{v}$$

Zu dieser Überzeugung gelangen auch Dorfmüller, Hering und Stierstadt (1998, vgl. S. 962) und Brehme (1968, vgl. S. 899 f.), der in der Verknüpfung von γ mit der Masse m bzw. m_0 zur relativistischen Masse $m_r = \gamma m_0$ den Versuch einiger Physiker sieht, weiterhin die gewöhnliche Koordinatengeschwindigkeit $\mathbf{v}$ im Zusammenhang mit dem Impuls $\mathbf{p}$ verwenden zu können, ohne auf die Vierer-Geschwindigkeit u^μ zurückgreifen zu müssen. An sich repräsentiere der Lorentz-Faktor γ aber ein besonderes kinematisches Merkmal der vierdimensionalen Raumzeit:

> The dynamical behavior of motion is „relativistic“ only through the relativistic nature on kinematics. [...] By assigning mass a relativistic character, we obscure both the simplicity and the essentially kinematic nature of relativity. (ebd., S. 900)

Einen ganz ähnlichen Gedanken formuliert auch Nolting (2016, S. 47):

> Wir betrachten schließlich noch die träge Masse m des Teilchens als Lorentz-Invariante, da nur „Raum und Zeit“ in der Speziellen Relativitätstheorie einer kritischen Revision unterworfen werden, nicht dagegen „Materie“.

(7) Definition der Masse

Bei der Problematik, welche Masse - die relativistische Masse m_r oder die invariante Masse m - die „richtige“ ist, ergibt sich nahezu zwangsläufig die Frage nach der Definition der Masse. Atkin (2015) schlägt beispielsweise in *Physics Education* vor, die Masse über die Betrachtung eines Stoßprozesses mit einem Standardkörper (mit der festgelegten Masse m_S) einzuführen:

Wie in Abbildung 3.5 (a) (S. 109) dargestellt, stößt die Masse m unelastisch mit der Standardmasse m_S zusammen und bildet so einen Körper der Masse $m + m_S$. Mit dem Impuls $\mathbf{p} \equiv m\mathbf{v}$ und dem Impulserhaltungssatz definiert Atkin die Masse m durch (vgl. ebd., S. 47):

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{vorher} &= \mathbf{p}_{nachher} \\ m\mathbf{v_1} &= (m + m_S)\mathbf{v_2} \\ m &\equiv \frac{m_S}{\frac{v_1}{v_2} - 1} \end{aligned}$$

Um dieses Prinzip direkt auf die Masse in der Speziellen Relativitätstheorie übertragen zu können (siehe Abbildung 3.5a (b), S. 109), geht Atkin auch dort von $\mathbf{p} \equiv m\mathbf{v}$ mit $m = \gamma m_0$ aus. Damit ergibt sich erneut Atkins Definitionsgleichung für die (relativistische) Masse m (vgl. ebd., S. 50):

$$\begin{aligned} m\mathbf{v}_1 &= M\mathbf{v}_2 \\ mc^2 + m_S c^2 &= Mc^2 \\ \Rightarrow m &= \frac{m_S}{\frac{v_1}{v_2} - 1} \end{aligned}$$

Dieses Ergebnis folgt aufgrund der Additivität der relativistischen Masse m bei der Betrachtung der Energien in der zweiten Gleichung. Mit dem Ziel, die Masse in der Relativitätstheorie genauso wie in der Newtonschen Mechanik definieren zu können, fordert Atkin, die relativistische Masse als die „eigentliche“ Masse zu verwenden:

> I would strongly advocate that the term *mass* should mean *relativistic mass*, not *rest mass* [Hervorhebungen im Original]. (ebd., S. 49)

Atkins Definition der Masse für die Relativitätstheorie muss entsprechend der Argumentation in Diskussionspunkt (5) (siehe S. 106) zur nicht legitimen Anwendung der klassischen Impulsdefinition im relativistischen Bereich jedoch kritisch gesehen werden.

Die Übertragbarkeit von Definitionen und Gleichungen aus der Newtonschen Mechanik spielt auch bei dem Versuch, die Masse als Trägheit eines Körpers zu bestimmen, eine wichtige Rolle. Die Idee, die Masse als zur Trägheit eines Körpers zuzuordnende physikalische Größe zu betrachten, wird gerade von Befürwortern des Konzeptes der relativistischen Masse genannt. Beispielsweise gibt Vasiliev (2012, vgl. S. 136, 142) an, die Masse eines Objektes müsse als die Messung der Trägheit dieses Objektes verstanden werden, welche mit der Energie E des Objektes verknüpft sei. Wenn man $E = m_r c^2$ nutzt, müsse diese Trägheitsmessung der relativistischen Masse m_r des Objektes entsprechen (vgl. S. 140). Auch Petkov (2009, vgl. S. 116) geht davon aus, die Masse eines Körpers beschreibe dessen Widerstand gegenüber einer Beschleunigung, also die Änderung seines Bewegungszustandes, und argumentiert:

> [...] from the very definition of mass as the measure of the *resistance* a particle offers to its acceleration or, in the framework of relativity, as the measure of the resistance a particle offers when deviated from its geodesic path. That resistance

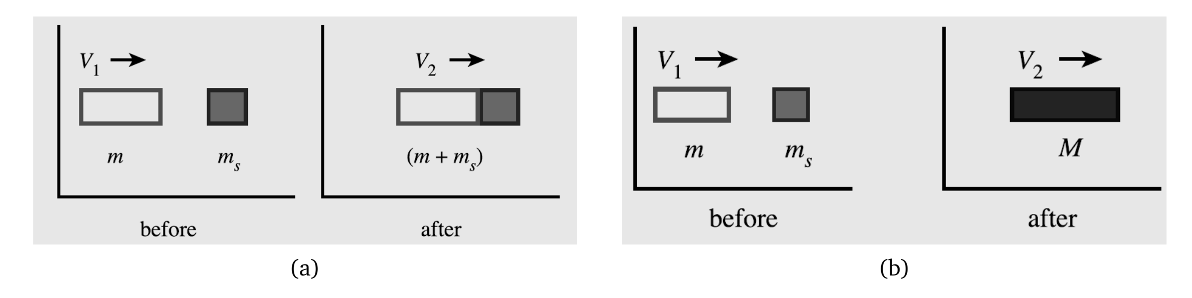


Abbildung 3.5: (a) Stoßprozess zur Definition der Masse (Atkin 2015, S. 48, Abb. 1)
(b) relativistische Beschreibung eines Stoßprozesses zur Definition der Masse (ebd., S. 50, Abb. 5)

> is different in different reference frames with respect to which the particle moves with different velocities. Therefore the particle mass should also differ in different frames. It should be stressed that the resistance arises *in* the particle; it does not come from the geometric properties of spacetime. It is spacetime that determines the shape of a geodesic worldline, but it is the particle that resists when prevented from following a geodesic path. We have a proof that the resistance does not originate in the geometry of spacetime - a particle whose worldtube is deformed due to its deviation from its geodesic shape offers the *same* resistance in flat and curved spacetime as the equivalence of inertial and passive gravitational masses shows [...] [Hervorhebungen im Original]. (ebd., S. 115 f.)

Diese Überlegung basiert vor allem auf der Begrifflichkeit des Widerstandes gegen Bewegungsänderung, welcher an dieser Stelle aber nur sehr unscharf geklärt wird.

In der Newtonschen Mechanik gelingt eine Quantifizierung dieses Widerstandes gegen Bewegungsänderung mithilfe des Verhältnisses zwischen dem Betrag der beschleunigenden Kraft und dem Betrag der dadurch verursachten Beschleunigung eines Körpers $\frac{F}{a}$. Gemäß des Newtonschen Grundgesetzes $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ (eigentlich $\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}$) kann die Masse damit als Proportionalitätsfaktor zwischen Kraft und Beschleunigung und damit als Messung der Trägheit gedeutet werden. In der Relativitätstheorie liegt allerdings ein komplizierterer Zusammenhang zwischen Kraft und Beschleunigung vor. Aufgrund der Abhängigkeit der Kraft von der Bewegungsrichtung können die folgenden beiden Fälle unterschieden werden, bei denen Kraft und Beschleunigung parallel sind (vgl. Hecht 2011b, S. 40; Bartelmann et al. 2015, S. 357):

- für $\mathbf{F} \perp \mathbf{v}$ gilt: $\mathbf{F}_\perp = \gamma m_0 \mathbf{a}_\perp$
- für $\mathbf{F} \parallel \mathbf{v}$ gilt: $\mathbf{F}_\parallel = \gamma^3 m_0 \mathbf{a}_\parallel$

Um die Masse analog zur Newtonschen Mechanik mit dem Ansatz $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ als Trägheitsmaß (Widerstand gegen Bewegungsänderung) interpretieren zu können, müsste eine „transversale

Masse“ m_t und eine „longitudinale Masse“ m_l eingeführt werden (vgl. Adler 1987, S. 740):

$$m_t \equiv \gamma m_0 \Rightarrow \mathbf{F}_\perp = m_t \mathbf{a}_\perp$$
$$m_l \equiv \gamma^3 m_0 \Rightarrow \mathbf{F}_{||} = m_l \mathbf{a}_{||}$$

Adler (1987, vgl. S. 740) argumentiert nun, dass wegen der Gleichheit der Terme die transversale Masse m_t der relativistischen Masse $m_r = \gamma m_0$ entsprechen müsse. Die transversale Masse wiederum könne aber gerade nicht für den Widerstand in Bewegungsrichtung (Trägheit) verantwortlich sein, da sie den Widerstand gegen eine Beschleunigung senkrecht zur Bewegungsrichtung kennzeichne. Deshalb sei ein Verständnis der (relativistischen) Masse als Trägheit nicht widerspruchsfrei zu erklären (siehe auch Okun 1989b, S. 632, 633 f.). Darum sind diese Massebegriffe heute auch nicht mehr gebräuchlich (vgl. Fließbach 2018, S. 48). Hinzukommend, so Adler, könne die Masse nicht als Trägheitsmaß wie in der Newtonschen Mechanik aufgefasst werden. Dort sei mit der Trägheit eine Eigenschaft von Körpern an sich verbunden, die nicht abhängig von äußeren Umständen sei. Betrachte man die longitudinale und die transversale Masse in der Relativitätstheorie aber als ein solches Trägheitsmaß, wäre die Masse nicht mehr alleinig eine Eigenschaft des zugehörigen Körpers, sondern auch abhängig von dessen Bewegung (vgl. Adler 1987, S. 740). Das bedeute laut Hecht (2011b, S. 40) allerdings nicht, dass

> [...] mass and inertia are not connected concepts; they surely are. It just means there is no simple relationship that informs a straightforward definition of mass.

Sandin (1991, vgl. S. 1034) zweifelt an Adlers Argument, da dieser die Masse als Trägheitsmaß über den Zusammenhang $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ bestimmt. Dies sei nach Sandin jedoch unzulässig, weil diese Gleichung nur für eine konstante Masse gilt, was die relativistische Masse wegen der Geschwindigkeitsabhängigkeit nicht ist. Die relativistische Masse sei nur dann konstant, wenn die Geschwindigkeit unveränderlich ist, was wiederum der Fall sei, wenn die Kraft senkrecht zur Bewegung gerichtet wäre. Daher sei die relativistische Masse in der Tat die transversale Masse. Sandin ergänzt:

> The related ideas that we must also have a so-called longitudinal relativistic mass or a supposed variation of relativistic mass with angle are erroneous because their derivations incorrectly attempt to use $m = \frac{|\mathbf{F}|}{|\mathbf{a}|}$ even when $\mathbf{F} \neq m\mathbf{a}$. (ebd.)

Embacher (2010, vgl. S. 214) ist davon überzeugt, dass die Masse auch in der Speziellen Relativitätstheorie als Trägheit angesehen werden könne, „allerdings nur *im Augenblick momentaner Ruhe* [Hervorhebung im Original]“ (ebd.). Dazu betrachtet Embacher die Bewegung eines geladenen Teilchens in einem äußeren elektromagnetischen Feld $\mathbf{E}(\mathbf{x})$ unter der Bedingung, dass das Teilchen zum Zeitpunkt t_0 ruht ($\mathbf{v}(t_0) = 0$). Zum Zeitpunkt t_0 würde das Teilchen dann mit $\mathbf{a}(t_0)$ durch das Feld $\mathbf{E}(\mathbf{x})$ beschleunigt werden:

$$\mathbf{a}(t_0) = \frac{q}{m}\mathbf{E}(\mathbf{x}_0)$$

Da die Masse m des Teilchens somit durch das Feld $\mathbf{E}(\mathbf{x})$, die Ladung q und die Beschleunigung $\mathbf{a}(t_0)$ eindeutig bestimmt ist, sei

> [...] gezeigt, dass die Masse (in ihrer Eigenschaft als *träge Masse*) in der Speziellen Relativitätstheorie ebenso wie in der Newtonschen Theorie den Widerstand gegen das Beschleunigtwerden (also die Trägheit) ausdrückt, allerdings nur *im Augenblick momentaner Ruhe* [Hervorhebung im Original]. (ebd.)

Das heißt, Embacher verknüpft die Trägheit nicht mit der relativistischen Masse m_r, sondern mit der invarianten Masse m.

Dazu in Kontrast betrachtet Okun nicht die (Ruhe-)Masse m als Maß für die Trägheit, sondern die Gesamtenergie E eines Objektes (vgl. Okun 2000, S. 1275; Okun 2005, S. 20). Kneubil (2018, vgl. S. 11) veranschaulicht diesen Gedanken anhand der Gleichungen zur Energie und zum Impuls, mit denen folgt:

$$E = \gamma mc^2$$
$$\mathbf{p} = \gamma m\mathbf{v}$$
$$\Rightarrow \mathbf{p} = \frac{E}{c^2}\mathbf{v}$$

Wenn nun die Trägheit in der Newtonschen Mechanik dem Faktor m_{Newton} in

$$\mathbf{p}_{Newton} = m_{Newton}\mathbf{v}$$

entspricht, wäre in der Relativitätstheorie damit übereinstimmend die Energie E mit der Trägheit eines Objektes verbunden.

Neben dem Ansatz zur Trägheit kann auch versucht werden, die Masse eines Objektes (in der Newtonschen Mechanik) als „Menge an Materie“ zu bestimmen (vgl. ebd., S. 1; Hecht 2011b, S. 40). Die Idee, die Masse eines Körpers mit der Menge des vorliegenden Stoffes zu identifizieren, bringt allerdings erhebliche Schwierigkeiten mit sich, da in der Relativitätstheorie die Masse eines Körpers aufgrund der Äquivalenz von Masse und Energie zunimmt, wenn dieser beispielsweise erwärmt wird. Trotz konstanter Anzahl an Teilchen wäre die Masse des Körpers somit dennoch veränderlich (vgl. Hecht 2011b, S. 40). Taylor und Wheeler (1992, vgl. S. 248) bemerken, dass die Masse nicht mit einer „Menge an Materie“ verknüpft sei, da beispielsweise Teilchen, die eine Bindung eingehen, als System eine geringere Masse als ursprünglich in Summe besitzen. Prozesse wie Kernfusion oder radioaktiver Zerfall, bei denen die Veränderung von Teilchen und deren Anzahlen nicht ohne weiteres mit der Masse in Verbindung gebracht werden kann, zeigen die engen Grenzen einer solchen Vorstellung (vgl. ebd.). Darum konstatieren Taylor und Wheeler:

> Nature does not offer us any such concept as „amount of matter“. History has struck down every proposal to define such a term. Even if we could count number of atoms or by any other counting method try to evaluate amount of matter, that number would not equal mass. (ebd.)

Eine weitere Möglichkeit, das Wesen der Masse zu bestimmen, steht im Zusammenhang mit der gravitativen Wechselwirkung (vgl. Kneubil 2018, S. 1). Demnach entspricht die Masse derjenigen Eigenschaft eines Objektes, welche die Wechselwirkungen desselben durch Gravitation bestimmt (vgl. Hecht 2011b, S. 40). Kneubil (2018, vgl. S. 12) beschreibt, wie im Rahmen

der Allgemeinen Relativitätstheorie jedoch die Bedeutung der Masse für die Gravitation durch diejenige der Energie abgelöst wird. Gravitative Wechselwirkungen werden darin nicht auf die (Ruhe-)Masse eines Objektes zurückgeführt (vgl. Okun 1987, S. 13), sondern werden durch den Energie-Impuls-Tensor beschrieben (vgl. z. B. Aubrecht 2004). Das heißt, die Wechselwirkung eines Objektes in einem Gravitationsfeld ist im Grunde abhängig von der Energie und dem Impuls des Objektes (vgl. Okun 1989b). Dieser Aspekt ist besonders für die Diskussion darüber wichtig, ob ein Photon eine Masse besitzt (siehe Diskussionspunkt (8), S. 112).

Als letzte hier dargestellte Option kann die Masse mithilfe der Erkenntnisse zur Äquivalenz von Masse und Energie, welche die Spezielle Relativitätstheorie liefert, charakterisiert werden. Hierzu schlägt Hecht (2011b, S. 43) die folgende Definition der Masse vor:

> The invariant mass of any object - elementary or composite - is a measure of the minimum amount of energy required to create that object, at rest, as it exists at the moment.

Dieser Ansatz lässt sich mithilfe von Gleichung (3.29) begründen:

$$\begin{aligned}\left(mc^2\right)^2 &= E^2 - (\mathbf{p}c)^2 \\ \Rightarrow m &= \sqrt{\left(\frac{E}{c^2}\right)^2 - \left(\frac{\mathbf{p}}{c}\right)^2}\end{aligned}$$

Offensichtlich ist die invariante Masse eines Objektes durch dessen Energie und Impuls festgelegt (vgl. Okun 2009, S. 430). Im Spezialfall des Ruhesystems des Objektes ($\mathbf{p} = 0$) gilt (3.30):

$$E_0 = mc^2$$

Basierend auf dieser Äquivalenz von Masse und Ruheenergie kann die Masse eines Objektes ohne Weiteres als dessen Ruheenergie interpretiert werden (vgl. Ogborn 2005, S. 221). Genau dieses Prinzip nutzt Hecht für die Definition der Masse. Dabei lässt sich die obige Formulierung selbstverständlich auch anpassen, so dass statt der „Erschaffung“ des Objektes dessen „Vernichtung“ fokussiert wird:

> Because energy is conserved, the *mass of any object at rest is a measure of the maximum amount of kinetic energy that can be liberated in the process of annihilating that object* [Hervorhebung im Original]. (Hecht 2011b, S. 43)

Beide Formulierungen sind äquivalent, da ihnen jeweils die Idee der Gleichung (3.30) zugrunde liegt. Dieser Zugang präferiert sehr deutlich, die invariante (Ruhe-)Masse m als „wahre“ Masse eines Objektes anzusehen und nicht dessen relativistische Masse m_r.

(8) Masse eines Photons

Wie bereits in Kapitel 3.1.1 (ab S. 87) ausgeführt, unterscheiden sich die beiden Ansätze 1 und 2 auch in der Frage, ob Photonen massebehaftete Objekte sind. Ansatz 1 ordnet Photonen

aufgrund deren Energie E_{Photon} eine relativistische Masse m_r zu:

$$m_r = \frac{E_{Photon}}{c^2}$$

Ansatz 2 sieht die Gleichung $E_0 = mc^2$ als zentral an und schlussfolgert, dass Photonen masselos seien, da sie kein Ruhesystem besitzen (Invarianz der Lichtgeschwindigkeit), so dass ihnen weder eine Ruheenergie noch eine Masse zugeschrieben werden könne (vgl. Tipler und Llewellyn 2010, S. 110; Okun 1989a, S. 32).

Diese Interpretation stößt bei Befürwortern des Konzeptes der relativistischen Masse auf Widerspruch. Einige typische Einwände werden von Sandin (1991, vgl. S. 1033) zusammengetragen, die verschiedene Punkte im Zusammenhang mit der Position masseloser Photonen nennt, die ihr widersprüchlich oder nur schwer nachvollziehbar erscheinen:

1. Obwohl Photonen keine Masse besitzen, wechselwirken sie dennoch gravitativ. (siehe auch Vasiliev 2012, S. 138)

2. Obwohl Photonen keine Masse besitzen, können sie Masse von einem Körper auf einen anderen übertragen.

3. Obwohl Photonen keine (träge) Masse besitzen, wird eine Kraft benötigt, um ihre Richtung zu ändern oder sie zu „starten“ bzw. zu „stoppen“.

4. Obwohl der Betrag des Impulses eines Photons $p = \frac{E}{c^2} \cdot c$ ist, entspricht $\frac{E}{c^2}$ dennoch nicht der Masse des Photons.

5. Obwohl einzelne Photonen jeweils keine Masse besitzen, ist es dennoch möglich, dass sie mit ihre Energie einen Beitrag zur Masse eines System liefern. Auf der anderen Seite wird einem System, dass aus Photonen besteht, die sich in die gleiche Richtung bewegen, keine Masse zugeordnet.

Sandin subsumiert diese Punkte unter der übergeordneten Fragestellung: „How could this anti-view of photons seem simple or consistent to an introductory student?“ (ebd.).

Die von Sandin vorgebrachten Punkte können jeweils auch im Ansatz 2 widerspruchsfrei erklärt werden. Beispielsweise wurden die Punkte 1. und 4. im Abschnitt zuvor ((7) Definition der Masse) im Hinblick auf die Rolle der Energie diskutiert. Hier wurde erläutert, dass die gravitative Wechselwirkung mithilfe des Energie-Impuls-Tensors beschrieben wird. Da Photonen eine Energie besitzen, unterliegen sie demnach auch der Gravitation. In 3. ist nicht ganz klar, was Sandin unter dem „Starten“ und „Stoppen“ eines Photons versteht, aber scheinbar wird dabei die Frage nach der Trägheit von Photonen gestellt. Auch diese Problematik wurde bereits im vorangestellten Abschnitt dargestellt (Trägheit ist in der Relativitätstheorie mit der Energie verknüpft). Die Punkte 2. und 5. werden im Ansatz 2 mithilfe der Masse-Ruheenergie-Äquivalenz ($E_0 = mc^2$) erklärt (siehe Kapitel 3.1.1, ab S. 87). Jeder Beitrag zur inneren Energie (Ruheenergie) eines Körpers oder Systems verändert aufgrund dessen auch die Masse dieses Körpers oder Systems.

Sandin behauptet jedoch nicht unbedingt, das Ansatz 2 bezüglich der obigen Punkte fehlerhaft sei. Vielmehr wird betont, dass die genannten Punkte für Nicht-Experten wenig nachvollziehbar oder sogar widersprüchlich erscheinen könnten. Insofern wird im Prinzip eine didaktische Frage aufgeworfen: Ist Ansatz 1 leichter verständlich, eher plausibel für Lernende? In diese Richtung argumentiert auch Atkin (2015, vgl. S. 50), der es als „irreführend" betrachtet, Photonen keine Masse zuzuordnen. Der Strahlungsdruck, welcher durch einen Impulsübertrag von Photonen erklärt werden könne, unterstreiche beispielsweise den Ansatz, Photonen mit einer (relativistischen) Masse zu beschreiben.

(9) Masse eines Systems (Additivität)

Die relativistische Masse m_r in Ansatz 1 ist additiv, das heißt, dass die Masse eines Systems sich einfach durch Addition der einzelnen relativistischen Massen der Bestandteile dieses Systems ergibt. Die (Ruhe-)Masse m in Ansatz 2 besitzt nicht diese Eigenschaft (vgl. Okun 1989b, S. 631). Inwiefern sich die beiden Ansätze 1 und 2 hinsichtlich dieses Aspektes unterscheiden, wurde bereits in Kapitel 3.1.1 (ab S. 87) dargestellt.

Aufgrund der fehlenden Additivität könnte Ansatz 2 als weniger intuitiv im Vergleich zu Ansatz 1 angesehen werden, da die (Ruhe-)Masse eines Systems in Ansatz 2 im Allgemeinen nicht der Summe der (Ruhe-)Massen der Systembestandteile entspricht (vgl. z. B. Embacher 2010, S. 222; Taylor und Wheeler 1992, S. 247; Tipler und Llewellyn 2010, S. 107). In Ansatz 2 ist die Masse eines Objektes mit seiner Ruheenergie verknüpft ($E_0 = mc^2$). Da in die Berechnung der Ruheenergie eines Systems neben den Ruheenergien der Teilchen des Systems zum Beispiel auch deren kinetische Energien eingehen (vgl. Adler 1987, S. 741; Griffiths 1996, S. 102; Hecht 2011b, S. 41; Kolbenstvedt und Stølevik 1991, S. 826; Okun 1989b, S. 632), so dass sich die (Ruhe-)Masse eines Körpers oder Systems durch Energiezufuhr oder -abgabe ändern kann (vgl. Embacher 2010, S. 224; Tipler und Llewellyn 2010, S. 99), ist die (Ruhe-)Masse nicht additiv. Dies erscheint auch für Whitaker (1976, S. 56) zugegebener Maßen „difficult to accept".

In der Tat bemängeln Befürworter des Ansatzes 1 diesen *scheinbaren* Widerspruch in Ansatz 2 (vgl. Sandin 1991, S. 1034; Vasiliev 2012, S. 138): Die kinetischen Energien der Teilchen eines Systems bewirken eine Massenzunahme des Systems, obwohl die kinetischen Energien der Teilchen nicht zu einer Vergrößerung der einzelnen Teilchenmassen führen. Sandin (1991, vgl. S. 1032 f.) sieht in der Additivität deshalb einen klaren Vorteil für die Zugänglichkeit bzw. Verständlichkeit des Ansatzes 1 mit relativistischer Masse m_r gegenüber Ansatz 2. Auch Khrapko (2000, S. 1269) betrachtet die fehlende Additivität der (Ruhe-)Masse in Ansatz 2 als Defizit:

> [...] the rest mass is lacking the property of additivity. We think that physicists do not mean the rest mass when they speak about beauty as a criterion for truth.

Zu einem sehr enthusiastischem Urteil im Hinblick auf die Bedeutung der Additivität der relativistischen Masse gelangt Ungar (2011, S. 47):

> Falling under the umbrella of the Minkowskian four-vector formalism, (5.3), and owing to its additivity property, (6.1), the relativistic mass is no longer the ugly

duckling of Einstein‘s special theory of relativity. Rather, it is the swan of the theory, [...].

(10) Legitimität und Status der relativistischen Masse

Nolting (2016, S. 51) bezeichnet die Einführung einer geschwindigkeitsabhängigen relativistischen Masse $m_r = m(v) = \gamma m_0$ als „lediglich abkürzende Schreibweise“, die „als eher unglücklich betrachtet werden“ müsse. Dabei fällt auf, dass Nolting das Konzept der relativistischen Masse nicht als physikalisch inkorrekt einstuft, aber hervorheben möchte, das die relativistische Masse für ihn keine wesentliche Bedeutung besitzt. Tatsächlich stellen sich aber auch mit Blick auf die bereits dargelegten Diskussionspunkte die Fragen, ob nur einer der beiden Ansätze 1 und 2 physikalisch bzw. mathematisch erlaubt ist, ob es unter beiden Ansätzen einen „richtigen“ und einen „falschen“ gibt, ob einer der Ansätze prinzipiell „verboten“ ist. Diesen Fragen soll im vorliegenden Abschnitt nachgegangen werden.

Hecht (2011a, vgl. S. 598) gibt an, dass zwar viele Physiker im Sinne des Ansatzes 2 überzeugt seien, dass die Masse eine bezugssystemunabhängige Größe ist, ergänzt aber: „even though there is no proof - theoretical or experimental - that it is“ (ebd.). Ein solcher Nachweis könne in Verbindung mit der Energie eines Objektes erbracht werden. Je nach Ansatz wird davon ausgegangen, dass die Masse eines Objektes durch seine innere Energie festgelegt ist (Ansatz 2, $E_0 = mc^2$) oder zusätzlich durch die kinetische Energie des Objektes mitbestimmt wird (Ansatz 1, $E = m_r c^2$). Ein möglicher Nachweis, welcher dieser beiden Zusammenhänge ($E_0 = mc^2$ oder $E = m_r c^2$) gültig ist, wäre jedoch schwierig, da dieser Nachweis „inextricably linked to a determination of the fundamental nature of mass“ sei und „beyond the purview of the special theory“ läge (ebd.).

Kneubil (2018, vgl. S. 13) stuft die beiden Ansätze 1 und 2 als äquivalent ein. Mit oder ohne relativistische Masse gelänge man zu denselben physikalischen Vorhersagen, zu der gleichen Physik. Diese Ansicht passt zu Okun (2008, vgl. S. 523), der eine mögliche Ursache für das Vorkommen beider Ansätze darin sieht, dass im Grunde die gleichen mathematischen Beziehungen und Werkzeuge genutzt werden würden, wodurch meist keine Abweichungen in den Ergebnissen entstehen dürften (vgl. auch Fließbach 2018, S. 53). Dies könnte allerdings auch eine fachdidaktische Fragestellung sein: Führt einer der beiden Ansätze eher zu Fehlern bei mathematischen Berechnungen? Denkbar wäre, dass eine Verkürzung der Gleichung $E = m_r c^2$ zu $E = mc^2$ (wie sie häufiger vorkommt) dazu führt, dass Lernende anstelle der relativistischen Masse $m_r = \gamma m_0$ nur die Ruhemasse m_0 in die zweite Gleichung für m einsetzen, um die Gesamtenergie E zu berechnen. Möglicherweise ist dahingehend Ansatz 2 weniger fehleranfällig, da hier nur eine einzige Masse verwendet wird. Dennoch könnten auch dabei Rechenfehler aus einer missverständlichen Notation der Masse-(Ruhe)Energie-Äquivalenz mit $E = mc^2$ statt $E_0 = mc^2$ (jeweils mit m als „Ruhemasse“) resultieren. In diesem Sinne kann die genaue mathematische Formulierung der Äquivalenz von Masse und Ruheenergie auch einen Einfluss auf die korrekte Anwendung der Gleichung und das inhaltliche Verständnis des Zusammenhangs der beiden physikalischen Größen haben.

Der übergeordneten Frage der mathematischen Legitimität der relativistischen Masse $m_r = \gamma m_0$ gehen konkret Bickerstaff und Patsakos (1995) nach. Sie legen dar, dass es grundsätzlich zwei gängige, mathematisch korrekte Optionen gibt, die Masse als invariante Größe der

Newtonschen Mechanik für die Relativitätstheorie zu generalisieren[3] (vgl. ebd, S. 64):

- Die Masse ist auch in der Relativitätstheorie eine skalare Größe, die sich unter Lorentz-Transformationen nicht verändert. (siehe Ansatz 2)

- Die Masse ist eine bezugssystemabhängige Größe, die wie die Zeitkomponente (0. Komponente) eines Vierervektors transformiert wird. (siehe Ansatz 1)

Insofern gestattet die Mathematik der Speziellen Relativitätstheorie nach Bickerstaff und Patsakos zwei unterschiedliche Massebegriffe (vgl. ebd., S. 66). Diese Ansicht teilt auch Fließbach (2018, vgl. S. 49), der ausführt, dass die relativistische Masse m_r (bis auf c) der Zeitkomponente des Vierer-Impulses entspricht (siehe Gleichung (3.21)), wodurch das Transformationsverhalten von m_r eindeutig bestimmt ist. Damit sei es prinzipiell legitim, den Begriff der relativistischen Masse mit $m_r = \gamma m_0$ zu definieren und anzuwenden. Fließbach ist außerdem überzeugt, die relativistische Masse habe damit eine „wohldefinierte physikalische Bedeutung“ (ebd., S. 40), da sie sich nur durch c^2 von der Gesamtenergie E unterscheide.

Im Gegensatz dazu gelangt Roche (2005, vgl. S. 239) unter Berücksichtigung eines geeigneten Messprinzips für die Masse zu dem Schluss, dass die relativistische Masse eben kein wohldefinierter Begriff sei. Roche bemerkt, dass die Messung der relativistischen Masse eines Objektes mithilfe eines Standardkilogramms im Ruhesystem des messenden Beobachters erfolgen müsste, was allerdings nicht, wie beispielsweise bei der Zeitmessung, möglich sei.

Beurteilt man die beiden Ansätze 1 und 2 jedoch nur nach den Kriterien der Logik und Mathematik, könnte man die Frage, welcher der beiden Ansätze verwendet werden kann bzw. soll, als „Geschmacksfrage“ einordnen (vgl. Bickerstaff und Patsakos 1995, S. 64). Jammer (2000, S. 56), der sich auf Bickerstaff und Patsakos (1995) bezieht, hält dazu fest:

> From the mathematical point of view both sides of the controversy can be equally well defended, provided the two generalizations are equally maintainable, and it is at this point that philosophical considerations come into play.

Laut Jammer, der die Problematik des Massebegriffs in der Relativitätstheorie auch aus einer philosophischen Perspektive beleuchtet, sei die Unterschiedlichkeit, die Gegensätzlichkeit der beiden Ansätze 1 und 2 auf zwei verschiedene wissenschaftsphilosphische Standpunkte zurückzuführen (vgl. Jammer 2000, S. 61). Hierzu stellt Jammer der Vorstellung, dass sich wissenschaftliche Theorien geradlinig und kumulativ zu immer genaueren Wissensbeständen und Beschreibungen der Welt weiterentwickeln, die Idee des Paradigmenwechsels in der Wissenschaft nach Kuhn gegenüber (vgl. ebd., S. 56 f.). Demnach seien die wissenschaftlichen Kategorien und Begriffe einer neueren Theorie mit denen einer älteren Theorie prinzipiell „inkommensurabel“, also von einander unabhängig, nicht miteinander vergleichbar und grund-

[3] Bickerstaff und Patsakos (1995, S. 63 f.) begründen dies wie folgt: „Since the Lorentz transformations hold for any c they *incorporate* the Galilean transformations and any quantity which is invariant under the Lorentz transformations [...] must also be invariant under the Galilean transformations. [...] However, it is clear that any quantity that transforms in the same way as the time variable will also be invariant in the Galilean limit (since time is unchanged by Gailean transformations) [Hervorhebung im Original].“ Da die Lorentztransformation der Zeit $t' = \gamma\left(t - \frac{v_x}{c^2}x\right)$ für $v \ll c$ in die Galilei-Transformation der Zeit $t' = t$ übergeht, erscheint auch der zweite Gedanke schlüssig.

sätzlich verschieden (vgl. ebd., S. 57). Jammer begründet die Inkommensurabilität der jeweiligen Massekonzepte in der Newtonschen Mechanik und in der Relativitätstheorie auch physikalisch: Die fehlende Additivität der invarianten (Ruhe-)Masse des Ansatzes 2, also die Tatsache, dass die (Ruhe-)Masse im Allgemeinen nicht erhalten bleibt, zeige, dass dieses Massekonzept nicht mit der newtonschen Masse vereinbar ist, da diese eine Erhaltungsgröße ist (vgl. ebd., S. 60). Auf der anderen Seite sei die Masse in der Newtonschen Mechanik eine invariante Größe, was nicht der Fall für die relativistische Masse des Ansatzes 1 ist. Somit könne keiner der beiden Massekonzepte in der Relativitätstheorie einfach mit dem newtonschen Massebegriff verglichen oder gleichgesetzt werden. Jammer schlussfolgert, dass hinter den Ansätzen 1 und 2 zwei verschiedene wissenschaftsphilosophische Postionen liegen (vgl. ebd., S. 61):

- Verneinung der Inkommensurabilität wissenschaftlicher Theorien:
  Die Newtonsche Mechanik wird als Grenzfall der Relativitätstheorie für $v \ll c$ betrachtet. Demnach müssten die Massekonzepte der Newtonschen Mechanik und der Relativitätstheorie einander gleichen, so dass, wie Okun (1989a, vgl. S. 31 f.) (siehe Diskussionspunkt (1)) ableitet, die invariante Masse in der Relativitätstheorie auch diejenige der Newtonschen Mechanik ist (Ansatz 2).

- Akzeptanz der Inkommensurabilität wissenschaftlicher Theorien:
  Die Relativitätstheorie wird als unabhängig (nicht-newtonsch) von der Newtonschen Mechanik angesehen. Damit ist es möglich, das Konzept der relativistischen Masse eigenständig und unabhängig von der Newtonschen Mechanik zu formulieren (Ansatz 1).

Kritikwürdig ist Jammers Analyse allerdings im Hinblick auf die folgenden beiden Gesichtspunkte: Erstens vernachlässigt Jammer in seiner Diskussion das Korrespondenzprinzip, das auch im Zuge der Theoriebildung wichtig ist und fordert, dass die physikalischen Aussagen der Relativitätstheorie für $v \ll c$ in die der Newtonschen Physik überführbar sein sollen. Nolting (2016, vgl. S. 45, 47 f.) nutzt das Korrespondenzprinzip beispielsweise, um die physikalischen Gesetze der Speziellen Relativitätstheorie aufstellen zu können, indem er entsprechende Randbedingungen für $v \ll c$ formuliert. Zweitens folgt aus der Akzeptanz der Inkommensurabilität nicht notwendigerweise das Konzept der relativistischen Masse. Im Widerspruch zu Jammers Unterscheidung beruht die Einführung der relativistischen Masse geradezu auf der Idee, mit $\mathbf{p} = m_r\mathbf{v}$ an die physikalischen Zusammenhänge der Newtonschen Mechanik anknüpfen zu wollen (siehe Diskussionspunkt (5)). Somit entspricht die Motivation einiger Vertreter des Ansatzes 1 (zum Beispiel Rindler (1990)) im Grundsatz eher einer Ablehnung des Prinzips der Inkommensurabilität.

Das Korrespondenzprinzip spielt auch für Fließbach (2018) eine entscheidende Rolle bei der Bewertung des Konzeptes der relativistischen Masse. Dabei spricht Fließbach von der „Logik der Theoretischen Physik“ (ebd., S. 52) oder genauer von der Logik „mit der physikalische Gesetze mit Hilfe von Symmetrien verallgemeinert werden“ (ebd., S. 51). Gemeint ist, dass physikalische Theorien (wie die Newtonsche Mechanik) in noch allgemeiner gültigen physikalischen Theorien (wie der Speziellen Relativitätstheorie) sozusagen „enthalten“ sein sollen. Die Gleichungen physikalischer Gesetze der Relativitätstheorie müssen sich im nicht-relativistischen Grenzfall zu den Gleichungen der Newtonschen Physik vereinfachen lassen (vgl. ebd., S. 51). Da das Ersetzen der newtonschen Masse durch die relativistische Masse in den newtonschen

Bewegungsgleichungen allerdings nicht immer zu einer korrekten relativistischen Verallgemeinerung führt, würde gegen die „Logik der Theoretischen Physik“ verstoßen werden (vgl. ebd., S. 52). Dies ist für Fließbach der bedeutendste Kritikpunkt in Verbindung mit dem Begriff der relativistischen Masse. Andere Aspekte, die gegen die Einführung der relativistischen Masse sprechen, sind für Fließbach zum Beispiel: Es ist „unschön“ zwei verschiedene Größen als Masse zu benennen. Die relativistische Masse ist keine notwendige Größe, da statt dessen einfach die Energie genutzt werden kann. Diese Aspekte bezeichnet er jedoch als „ästhetische Punkte“, die als „Geschmackssache“ einzuordnen seien (ebd., S. 50).

Im Dissens dazu betont Oas (2008, S. 2), dass die Verwendung der relativistischen Masse gemäß Ansatz 1 eben nicht nur „a matter of taste“ sei, da dies nicht konsistent mit dem Vierervektor-Formalismus wäre. Jammer (2000, vgl. S. 54) stellt hingegen fest, dass zumindest in der Literatur nicht diese strikte Auffassung abgebildet werde, da trotz der Verwendung des Vierervektor-Formalismus dennoch in Teilen die geschwindigkeitsabhängige relativistische Masse eingeführt werde. Unabhängig davon, ob die Einführung der relativistischen Masse grundsätzlich „Geschmackssache“ ist oder nicht, stellt sich jedoch die Frage, ob und wenn ja, welcher der beiden Ansätze 1 und 2 in der Fachgemeinschaft der Physiker bevorzugt verwendet wird. Diesbezüglich kann festgehalten werden, dass im Allgemeinen, aber speziell in der Teilchenphysik eine Tendenz beobachtet werden kann, auf den Gebrauch der relativistischen Masse zu verzichten (vgl. Jammer 2000, S. 55; Kobel et al. 2018, S. 10; Leong und Chin 2005, S. 57, 60; Okun 1989b, S. 629; Roche 2005, S. 239), wie sich auch anhand der Untersuchung von Oas (2008) (siehe Kapitel 3.1.1, S. 91) vermuten lässt.

Damit zeichnet sich insgesamt das folgende Bild: Zwar scheinen beide Ansätze mathematisch gerechtfertigt zu sein, so dass keine substanziellen Einwände gegen die relativistische Masse bestehen, was diese Perspektive betrifft. Dennoch nimmt die Relevanz des Ansatzes 1 in der Fachwelt wahrscheinlich ab, so dass Ansatz 2 bedeutsamer sein könnte.

(11) Interpretationen experimenteller Daten

Da die Physik eine empirische Wissenschaft ist, stellt sich die Frage, ob die Ergebnisse entsprechender Experimente für oder gegen einen der beiden Ansätze sprechen. Hierzu können geladene Teilchen so in ein magnetisches Feld bewegt werden, dass sie aufgrund der Lorentzkraft $\mathbf{F}_L$ auf eine Kreisbahn gezwungen werden, deren Radius r abhängig von der Geschwindigkeit $\mathbf{v}$, der (Ruhe-)Masse m und der Ladung q des Teilchens sowie der Stärke des Magnetfeldes $\mathbf{B}$ ist. Mit einer solchen Messanordnung kann dann die Masse (bzw. der Impuls) des Teilchens in Abhängigkeit von seiner Geschwindigkeit bestimmt werden (vgl. Tipler und Llewellyn 2010, S. 116):

$$\mathbf{F}_L = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}$$

$$\vdots$$

$$\Rightarrow Bqr = m\gamma v = p$$

Solche Experimente wurden zuerst von Kaufmann durchgeführt, der damit die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse untersuchen wollte (vgl. Hecht 2009b, S. 799). Bei der Interpretation der experimentellen Ergebnisse muss allerdings beachtet werden, aus welchem der

Ansätze 1 bzw. 2 heraus argumentiert wird. Deswegen hebt Okun (1989a, vgl. S. 35) hervor, dass solche Experimente zunächst nicht die Abhängigkeit der Masse von der Geschwindigkeit der Teilchen untersuchen würden, sondern die Abhängigkeit des Impulses von der Geschwindigkeit. Die genaue Interpretation der Ergebnisse kann dann je nach Definition des Impulses unterschiedlich ausfallen (vgl. Hecht 2009b, S. 799):

- Ansatz 1:
  $\mathbf{p} = \gamma m \cdot \mathbf{v} = m_r \mathbf{v} \Rightarrow m_r = m(v) = \frac{Bqr}{v}$
  In diesem Fall zeigen die experimentellen Daten eine Zunahme der (relativistischen) Masse mit der Geschwindigkeit der Teilchen (vgl. ebd.).

- Ansatz 2:
  $\mathbf{p} = m \cdot \gamma \mathbf{v} \Rightarrow p = \gamma p_{Newton} = Bqr$
  In diesem Fall zeigen die experimentellen Daten, dass der Impuls nicht linear mit der Geschwindigkeit der Teilchen zunimmt, während die Masse der Teilchen unverändert bleibt (vgl. ebd.). Das heißt, bei großen Teilchengeschwindigkeiten gilt, dass der relativistische Impuls eines Teilchens größer ist, als aufgrund der Newtonschen Mechanik erwartet (vgl. Ogborn 2005, S. 221).

Somit können beide Ansätze zur Deutung der Experimente herangezogen werden:

> Actually, all the experiments show is that p is not linearly dependent on v, for v approaching c. One may, if one wishes, *interpret* [Hervorhebung im Original] this as due to an increase in m_r; or one may simply interpret it as evidence for the factor γ in equation (3) [$\mathbf{p} = \gamma m \mathbf{v}$]. (Bickerstaff und Patsakos 1995, S. 65)

(12) Problematische Vorstellungen

Ein Argument gegen die Einführung der relativistischen Masse ist die Befürchtung, die Idee einer geschwindigkeitsabhängigen Masse könnte problematische Vorstellungen und Missverständnisse bedingen (vgl. Okun 1998, S. 405). Konkret führt eine Unterscheidung zwischen einer Ruhemasse und einer relativistischen Masse, die mit der Geschwindigkeit eines Objektes zunimmt, zu der Frage, „woher die extra Masse kommt“ (Ogborn 2005, S. 221) und möglicherweise zu der Vorstellung, dass Objekte bei höheren Geschwindigkeiten tatsächlich massiver werden (vgl. Oas 2008, S. 5). Damit könnten unangemessene Vorstellungen über mögliche Veränderungen der inneren Struktur bewegter Objekte provoziert werden (vgl. Adler 1987, S. 742; Taylor und Wheeler 1992, S. 251; Manor 2015, S. 1407). Es entstünden unter anderem Fragestellungen, wie (vgl. Oas 2008, S. 5):

- Wie erhöht der Körper seine Masse? Wie wird er massiver?
- Verändert sich die Anzahl der Teilchen aus denen der Körper besteht?
- Mit welchem Messverfahren könnte diese Erhöhung ermittelt werden?

Es würde also unter Umständen vermittelt werden

> [...] that the effects of relativity are due to „something happening“ to the particle, whereas they are of course due to the properties of space-time. (Whitaker 1976, S. 55)

Kneubil (2018, vgl. S. 13 f.) befürchtet aus einer didaktischen Perspektive, dass eine Verwendung der beiden Begriffe „Ruhemasse“ und „relativistische Masse“ in Ansatz 1 gegebenenfalls zu Missverständnissen führen könnte, weil damit unterschiedliche Bedeutungen mit dem Begriff „Masse“ verbundenen werden können. Die begriffliche Mehrdeutigkeit könnte sich allerdings auch in konzeptionellen, inhaltlich inadäquaten Vorstellungen niederschlagen. So fand Oas (2008) Hinweise darauf, dass Lernende, geleitet von der Idee einer geschwindigkeitsabhängigen Masse, auch annehmen, die Ruhemasse eines Körpers nehme mit der Erhöhung seiner Geschwindigkeit zu. Das entspricht einem Verständnis der Masse, das in jedem Falle (sowohl in Ansatz 1 als auch in Ansatz 2) physikalisch nicht korrekt ist. In einer kleinen nicht repräsentativen Erhebung präsentierte Oas (2008) insgesamt 164 Studierenden jeweils einen kurzen Ausschnitt eines allgemeinverständlichen Textes zur Relativitätstheorie, in dem eine geschwindigkeitsabhängige Masse genutzt wird. Anschließend wurden den Studierenden die folgenden beiden Fragen gestellt:
Al und Bob sind zwei identische Zwillinge (exakt gleiche Körper). Bob beobachtet Al vom Bahnsteig aus. Al befindet sich in einem Eisenbahnwagen, der sich relativ zu Bob geradlinig und mit einer konstanten, sehr hohen Geschwindigkeit bewegt. Bob liest von seiner eigenen Waage einen Wert von 90 kg ab.[4] Die befragten Studierenden sollten für die Fälle a) und b) angeben, ob eine kleinere (<), größere (>) oder gleich große (=) Masse abgelesen wird:

a) Welchen Wert kann Bob von Al’s Waage ablesen?

b) Welchen Wert kann Al von seiner eigenen Waage ablesen?

Diese Fragen wurden von den Studierenden wie in Tabelle 3.3 (S. 121) dargestellt, beantwortet. Von Oas wird hervorgehoben, dass lediglich 28 der 164 Studierenden (17%) im Sinne des Ansatzes 2 antworten, während immerhin insgesamt 57 Befragte (35%) angaben, dass sich die Masse im Ruhesystem von Al verändert. Dies ist jedoch unabhängig von einer Präferenz für einen der beiden Ansätze 1 oder 2 eine fachwissenschaftlich inakzeptable Vorstellung, da die (Ruhe-)Masse von Al sich nicht verändern kann, so dass Al stets denselben Wert (90 kg) von seiner eigenen Waage abliest. Ob die Einführung der relativistischen Masse diese ungünstige Vorstellung bedingt, konnte Oas mit seinen Resultaten nicht abschließend entscheiden. Er hält jedoch fest, dass sich anhand des uneinheitlichen Antwortbildes gezeigt hätte, wie es zu Verwirrungen der Lernenden kommen könne (vgl. ebd., S. 6).

[4] Im Original wurde eine Masse von 200 Pfund angegeben. Im Sinne einer besseren Lesbarkeit nach deutschem Sprachgebrauch wird die Masse hier jedoch entsprechend in kg verwendet.

Tabelle 3.3: Ergebnisse einer Befragung von Studierenden (Oas 2008, S. 6, Tab. 1)

	→ Antworten zu b)		
↓ Antworten zu a)	$> 90\,kg$	$= 90\,kg$	$< 90\,kg$
$> 90\,kg$	24	70	8
$= 90\,kg$	11	28	7
$< 90\,kg$	2	9	5

Fazit

Die Diskussionspunkte (1) bis (12) zeichnen insgesamt folgendes Bild: Formal mathematisch betrachtet erscheint die Definition einer geschwindigkeitsabhängigen relativistischen Masse prinzipiell legitim zu sein (siehe Diskussionspunkt (10), S. 115), so dass die Einführung der relativistischen Masse aus dieser Perspektive heraus nicht als „fehlerhaft“ oder „verboten“ eingeordnet werden kann. Entsprechende Experimente zur Massebestimmung können sowohl mit (Ansatz 1) als auch ohne (Ansatz 2) relativistische Masse interpretiert werden und sind soweit nicht in der Lage über die Gültigkeit der beiden Ansätze zu entscheiden (siehe Diskussionspunkt (11), S. 118).

Gleichwohl ist mit dem Konzept einer geschwindigkeitsabhängigen Masse inhaltlich kein fundamental bedeutsames Konzept verknüpft (siehe Diskussionspunkt (3), S. 103). Demgegenüber wird die (Ruhe-)Masse eines Teilchens als charakteristische, definierende Eigenschaft eines Teilchens angesehen (siehe Diskussionspunkt (4), S. 105).

Einwände gegen die Begrifflichkeit der relativistischen Masse werden gerade in Bezug auf Konsistenzfragen im Vierervektor-Formalismus (siehe Diskussionspunkt (1), S. 101), Unklarheiten bzw. Schwierigkeiten durch die Kombination nichtrelativistischer mit relativistischen Gleichungen (siehe Diskussionspunkt (5), S. 106) sowie dem Ursprung des Lorentz-Faktors im Ausdruck für den relativistischen Impuls (siehe Diskussionspunkt (6), S. 107) gesehen.

Andererseits empfinden Befürworter der relativistischen Masse das Konzept durchaus als nützlich (siehe Diskussionspunkt (2), S. 102) und teilweise besser verständlich als Ansatz 2 (siehe Diskussionspunkt (8), S. 112 und (9), S. 114). Der Verstehensprozess könnte allerdings auch gerade durch die Verwendung verschiedener Massebegriffe sowie der damit verbundenen problematischen Vorstellung, die (Ruhe-)Masse eines Objektes nehme mit der Geschwindigkeit desselben zu, erschwert werden (siehe Diskussionspunkt (12), S. 119).

Letztlich steht die Frage der Einführung der relativistischen Masse auch in Zusammenhang mit der Definition der Masse als physikalische Größe an sich. Inwieweit diesbezüglich die Masse als Trägheitsmaß oder „Menge an Materie“ angesehen werden kann und welche Verbindung zur gravitativen Wechselwirkung oder auch zur Ruheenergie eines Objektes besteht, wurde in Diskussionspunkt (7) (S. 107) erläutert.

Während in der Literatur zwar prinzipiell beide Ansätze vorgefunden werden können, scheint dennoch der Ansatz 2 gegenüber Ansatz 1 in der Fachwelt an Bedeutung zu gewinnen (siehe Diskussionspunkt (10), S. 115 und Kapitel 3.1.1, ab S. 87).

In Summe bilden die hier vorgestellten Diskussionspunkte zwei sich kontrovers gegenüberstehende Fachpositionen ab, wie im folgenden Kapitel konkret beschrieben werden soll.

3.2 Einordnung als wissenschaftliche Kontroverse

Der Diskurs zwischen bzw. über die beiden Ansätze 1 und 2 wird in diesem Kapitel als *wissenschaftliche Kontroverse* eingeordnet. Hierzu werden die in Kapitel 2.1.2 (ab S. 24) dargelegten sieben Merkmale einer wissenschaftlichen Kontroverse herangezogen und im Folgenden einzeln erörtert.

(1) verschiedene, miteinander unvereinbare Positionen

Wie in Kapitel 3.1.1 (ab S. 87) vorgestellt, bestehen im Hinblick auf das Massekonzept in der Speziellen Relativitätstheorie zwei verschiedene physikalische (und somit fachspezifische) Ansätze. So vertreten Fachwissenschaftler, wie beispielsweise Adler (1987), Okun (1989a), Taylor und Wheeler (1992) oder Griffiths (1996) die Ansicht, die Masse eines Objektes sei eine invariante Größe und somit unabhängig von der Geschwindigkeit. Auf der anderen Seite sind Befürworter der Einführung einer relativistischen Masse, wie zum Beispiel Rindler (1990), Sandin (1991), Petkov (2009) oder Vasiliev (2012) davon überzeugt, die Masse nehme mit der Geschwindigkeit zu. Auch Tabelle 3.1 (S. 89) sowie die Literaturanalyse von Oas (2008) (siehe Kapitel 3.1.1, ab S. 87) zeigen, dass diese beiden Ansätze in der Fachwelt vorkommen. Insofern kann festgehalten werden, dass verschiedene fachwissenschaftliche Positionen zur Frage der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse vorliegen.

Beide Positionen schließen einander jedoch logisch aus: Die Masse kann entweder als bezugssystemabhängige oder -unabhängige Größe betrachtet werden. Es können nicht beide Ansätze gleichzeitig konsistent vertreten werden. Beide Positionen können allerdings in einem wissenschaftlichen, physikalischen Kontext gerechtfertigt werden (siehe z. B. Diskussionspunkt (10) in Kapitel 3.1.2, S. 115).

(2) argumentativer, kritischer Diskurs und (3) öffentlicher Diskurs

In einer wissenschaftlichen Kontroverse werden Argumente, Belege und vor allem gegenseitige Kritik offen unter Wissenschaftlern ausgetauscht. Die in Kapitel 3.1.2 (ab S. 101) dargestellten zwölf Diskussionspunkte illustrieren die beiden Merkmale (2) und (3) wissenschaftlicher Kontroversen (siehe Kapitel 2.1.2, ab S. 24) für den Diskurs um die relativistische Masse. Die dort diskutierten Gesichtspunkte fassen Argumente und Gegenargumente von Fachwissenschaftlern zusammen, die in entsprechenden Fachzeitschriften, für die wissenschaftliche Gemeinschaft zugänglich, publiziert wurden. Dabei werden beispielsweise Aspekte der Widerspruchsfreiheit (siehe Kapitel 3.1.2, Diskussionspunkt (1), S. 101) oder der Erklärungskraft (siehe Kapitel 3.1.2, z. B. Diskussionspunkt (8), S. 112 oder (9), S. 114 oder (11), S. 118) eines Ansatzes betrachtet. Hinzu kommt aber auch, und das ist wesentlich, wechselseitige Kritik, in der sich Wissenschaftler in ihren Artikel aufeinander beziehen und auf die Argumente anderer reagieren. Dies zeigt sich beispielsweise bei Sandin (1991) durch die Bezugnahme auf einen Artikel von Adler (1987), bei Vasiliev (2012) in der Auseinandersetzung mit Okun (1989a), bei Petkov (2009), der die Position von Taylor und Wheeler (1992) in Frage stellt oder bei einem Kommentar von Khrapko (2000) zu Okun (1989b), auf den Okun (2000) antwortet.

(4) Relevanz für eine bestimmte Personengruppe

Der Disput zur Verwendung der relativistischen Masse ist für die Gemeinschaft der Physiker bedeutsam, da dabei das Verständnis eines Grundbegriffes der Physik verhandelt wird und auch insgesamt die physikalische Bedeutung der Größe Masse zur Diskussion steht. Konkret spiegelt sich diese inhaltliche Tragweite in Fragen zum Wesen der Masse wider, wie beispielsweise:

- Ist die Masse eines Objektes eine fundamentale Eigenschaft, durch die insbesondere die Teilchenarten bestimmt sind? (siehe Kapitel 3.1.2, Diskussionspunkt (4), S. 105)
- Was ist Masse bzw. wie kann sie definiert werden? Welche physikalische Eigenschaft eines Objektes beschreibt die Masse? (siehe Kapitel 3.1.2, Diskussionspunkt (7), S. 107)
- Sind Photonen massebehaftete Objekte? (siehe Kapitel 3.1.2, Diskussionspunkt (8), S. 112)
- Ist die Masse eine additive Größe? Setzt sich die Masse eines Körpers allein aus den Massen seiner Bestandteile zusammen? (siehe Kapitel 3.1.2, Diskussionspunkt (9), S. 114)

Neben der inhaltlichen Bedeutsamkeit kann auch die „Sichtbarkeit“ der Diskussion um das Konzept der relativistischen Masse in wissenschaftlichen Publikationen als Kriterium für deren Relevanz herangezogen werden. Eben diese fachöffentliche Repräsentation kann anhand der Darlegung der verschiedenen Diskussionspunkte in Kapitel 3.1.2 (ab S. 101) nachvollzogen werden. Darüber hinaus enthalten auch verschieden Lehrbücher der Physik (z. B. Greiner und Rafelski 1992, S. 85; Dorfmüller, Hering und Stierstadt 1998, S. 962; Meschede (Hrsg.) 2010, S. 647) Hinweise auf die uneinheitliche Verwendung der unterschiedlichen Ansätze 1 und 2, wie das folgende Beispiel zeigt:

> Gelegentlich wird die Größe $m \equiv \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ als „geschwindigkeitsabhängige Masse“ bezeichnet. [...] Man muss aber unbedingt beachten, dass die Größe m, im Gegensatz zu m_0, keine lorentzinvariante Größe ist. (Meinel 2016, S. 57)

Die Relevanz des Diskurses um die Einführung einer geschwindigkeitsabhängigen Masse wird besonders deutlich, wenn Experten diesbezüglich selbst die Existenz unterschiedlicher Ansätze feststellen (vgl. z. B. Leong und Chin 2005, S. 57; Kneubil 2018, S. 13), von „zwei Schulen“ (Hecht 2009a, S. 336) oder einer „heated debate“ (Jammer 2000, S. 54) sprechen. Manor (2015, S. 1407), Petkov (2009, S. 114) und Jammer (2000, S. 56) bezeichnen die Diskussion zu Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse als Kontroverse und Millette (2017, S. 202) formuliert hierzu: „There is no consensus in physics community on the validity and use of the concept of relativistic mass.“ Dies drückt die Wahrnehmung der Wissenschaftler bzw. ein Bewusstsein für die Kontroverse aus und zeigt somit die Bedeutung bzw. den Status der Problemstellung um den Begriff der Masse auf.

(5) Unauflösbarkeit des Konflikts

Trotz der verschiedenen in Kapitel 3.1.2 (ab S. 101) vorgestellten Diskussionspunkte hat sich soweit nicht gezeigt, dass einer der Ansätze 1 oder 2 rein prinzipiell illegitim ist. Weder unter

mathematischen Kriterien noch unter experimentellen Gesichtspunkten (Möglichkeit unterschiedlicher Interpretationen der Experimente) ist eine Entscheidung für genau einen der beiden Ansätze zwingend (siehe Kapitel 3.1.2, Diskussionspunkt (10), S. 115 und (11), S. 118). Als mögliche zusätzliche Entscheidungskriterien werden Aspekte im Zusammenhang mit der Relevanz der unterschiedlichen Massebegriffe (siehe Kapitel 3.1.2, Diskussionspunkt (3), S. 103 und (4), S. 105), der Verständlichkeit (siehe Kapitel 3.1.2, z. B. Diskussionspunkt (9), S. 114) oder problematische Vorstellungen (siehe Kapitel 3.1.2, Diskussionspunkt (12), S. 119) genannt. Diese lassen aber nicht unweigerlich nur einen der Ansätze 1 oder 2 zu. Es sind zum Teil subjektive bzw. „weichere" Kriterien, als die mathematische Widerspruchsfreiheit oder empirische Evidenz. Da insofern keiner der beiden Ansätze 1 und 2 grundsätzlich ausgeschlossen werden kann, steht kein absolutes, wissenschaftliches Verfahren zur Verfügung, um die Kontroverse zur Einführung der relativistischen Masse zweifelsfrei aufzulösen. Daher wird eine Präferenz für einen der beiden Ansätze 1 oder 2 teilweise sogar als „Geschmackssache" (siehe Kapitel 3.1.2, z. B. Diskussionspunkt (10), S. 115) eingestuft.

Als möglicher Indikator für die Unauflösbarkeit des Konfliktes unterschiedlicher Positionen kann auch die Beständigkeit der kontroversen Standpunkte dienen. Beispielsweise kann man für eine zeitliche Einordnung zum einen das Publikationsjahr des für den Diskurs markanten Beitrags „The Concept of Mass" von Okun (1989a), welcher danach in den Diskussionsartikeln zur Relativität der Masse häufig zitiert wurde, nehmen. Zum anderen könnte man davon ausgehen, dass auch 2018, dem Erscheinungsjahr des Buches „Die relativistische Masse", in dem Fließbach (2018) aus Sicht der theoretischen Physik Pro und Contra diskutiert, die Kontroversität der Thematik weiterhin besteht. So ließe sich eine Dauer der Kontroverse um die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse über drei Jahrzehnte abschätzen und damit eine hinreichende Beständigkeit des kontroversen Diskurses der Ansätze 1 und 2 belegen.

(6) Einfluss grundlegender Voraussetzungen oder Annahmen

Im Rahmen wissenschaftlicher Kontroversen können Ursachen des fachlichen Diskurses in unterschiedlichen Voraussetzungen oder Grundannahmen gefunden werden. Solche Unterschiede können in der Diskussion zur Relativität der Masse zum Beispiel bei der Bedeutung bzw. Definition der Masse gefunden werden (siehe Kapitel 3.1.2, Diskussionspunkt (7), S. 107): Ist die Masse ein Maß für die Trägheit? Entspricht die Masse einer „Menge an Materie"? Haben alle Objekte, die der Gravitation unterliegen, eine Masse?

Laut Fließbach (2018, S. 37) steht die Beurteilung der beiden Ansätze 1 und 2 im Zusammenhang mit der „Logik zur Aufstellung physikalischer Gesetze". Damit beschreibt Fließbach die Abhängigkeit der Positionierung zu den Ansätzen 1 und 2 von einer sehr grundlegenden Bedingung, hinter der die fundamentale Frage steht, wie wissenschaftliche Theorien aufgebaut bzw. formuliert werden sollten. Jammer (2000) ist sogar davon überzeugt, dass bei der Entscheidung für einen der beiden Ansätze 1 oder 2 auch wissenschaftsphilosophische Erwägungen zum Tragen kommen (siehe Kapitel 3.1.2, Diskussionspunkt (10), S. 115).

(7) Subjektivität

Auch wenn in der wissenschaftlichen Praxis der Anspruch möglichst hoher Objektivität besteht, können subjektive Elemente, zum Beispiel in der Diskussion wissenschaftlichen Wissens,

nicht ausgeklammert werden. Dementsprechend können auch Wissenschaftler immer nur eine persönliche, subjektive Perspektive zu wissenschaftlichen Problemstellungen einnehmen. Diese individuelle Perspektive kann beispielsweise durch die Zugehörigkeit zu einer bestimmten „Fach-Community“ geprägt sein. So wird von einigen Autoren (vgl. Jammer 2000, S. 55; Kobel et al. 2018, S. 10; Leong und Chin 2005, S. 57, 60; Okun 1989b, S. 629; Roche 2005, S. 239) angegeben, dass insbesondere unter Teilchenphysikern eine starke Präferenz zu Ansatz 2 besteht.

In welchem konkreten Maße die Relativität der Masse eine kontroverse Fragestellung für den einzelnen Wissenschaftler ist, hängt sicherlich sowohl von der Relevanz der Problemstellung für den eigenen Arbeitsbereich als auch davon ab, inwieweit der persönliche fachliche Standpunkt durch die jeweiligen Diskussionspunkte (siehe Kapitel 3.1.2, ab S. 101) herausgefordert wird. Beispielsweise würde ein überzeugter Gegner des Konzeptes der relativistischen Masse (Ansatz 1) wie Okun, der eine geschwindigkeitsabhängige Masse nicht vereinbar mit dem Vierervektor-Formalismus hält, möglicherweise seine eigene, sehr gefestigte Fachposition nicht weiter in Frage gestellt sehen und die Thematik insofern kaum oder nur geringgradig als kontrovers betrachten.

Ein weiterer mit der Subjektivität verbundener Aspekt ist, dass Kontroversität in der Wissenschaft nicht unabhängig von der zeitlichen Entwicklung ist. Bezogen auf den Diskurs der beiden Ansätze 1 und 2 bedeutet dies, dass sich der Trend hin zur Anwendung des Ansatzes 2, den Oas (2008) seiner Analyse der Fachliteratur entnimmt, zukünftig weiter durchsetzen könnte und Ansatz 1 unter Umständen zunehmend verdrängt. Über die Zeit könnte sich dadurch ein Konsens unter Physikern etablieren, der kontinuierlich zu einem Abbau von Kontroversität in der wissenschaftlichen Gemeinschaft führt. In diesem Prozess wird dem einen Wissenschaftler die Relativität der Masse noch kontrovers erscheinen, während sie für einen anderen schon nicht mehr besonders diskussionswürdig ist.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Thematik der Relativität der Masse die charakteristischen Merkmale einer wissenschaftlichen Kontroverse erfüllt. Wie die in diesem Kapitel behandelten Belege zeigen, kann die Diskussion um die beiden Ansätze 1 und 2 entsprechend der Begriffsbildung in Kapitel 2.1.2 (ab S. 24) als wissenschaftliche Kontroverse eingeordnet werden. Diese Einordnung sollte, wie in Merkmal (7) erläutert, als „Momentaufnahme“ verstanden werden, da es möglich ist, dass in Zukunft einer der beiden Ansätze durch die physikalische Gemeinschaft konsensfähig favorisiert werden wird. Eine solche, auf einen der beiden Ansätze zulaufende Entwicklung im Aushandlungsprozess könnte bereits begonnen haben. Zumindest ließe sich diese Vermutung bezugnehmend auf die Ergebnisse der Literaturanalyse von Oas (2008) ableiten.

3.3 Schlussfolgerungen für den Physikunterricht

3.3.1 Schulische Perspektive zur Relativität der Masse

In Kapitel 3.2 (ab S. 122) wurde die Frage nach der Relativität der Masse als wissenschaftliche Kontroverse eingeordnet. Da dieser Fachinhalt gemäß der Lehr- bzw. Bildungspläne der Bundesländer (siehe Tabelle 3.4, S. 127) ein relevantes Thema des Physikunterrichts an Schulen ist, soll in diesem Kapitel aufgezeigt werden, wie dieser Inhalt grundsätzlich im Schulkontext dargestellt werden kann, um den Anforderungen an Kontroversität möglichst gerecht werden zu können. Dabei ist es das Ziel, anhand der Prinzipien zum Umgang mit wissenschaftlichen Kontroversen, wie sie in Kapitel 2.4.1 (ab S. 67) eingeführt wurden, für den Physikunterricht zur Masse in der relativistischen Dynamik Leitideen zu skizzieren, welche durch die Physiklehrkräfte konkretisiert ausgestaltet und umgesetzt werden können. Damit lautet die zentrale Fragestellung dieses Kapitels: *Wie soll die Thematik der Relativität der Masse im Physikunterricht dargestellt werden?* Vorbereitend wird im nachstehenden Abschnitt die schulische Perspektive auf die Thematik der Relativität der Masse analysiert.

Nach Härtig, Kauertz und Fischer (2012, S. 198) zählen zu den häufigsten Quellen für die Unterrichtsvorbereitung von Lehrkräften die jeweiligen Lehr- und Bildungspläne, Schulbücher sowie das eigene Vorwissen bzw. die Erfahrung der Lehrkräfte. Um zunächst die schulische Perspektive auf die in Frage stehende Thematik zu erfassen, ist eine Analyse der Lehr- bzw. Bildungspläne der Bundesländer hilfreich. Hierbei findet sich die geschwindigkeitsabhängige relativistische Masse, als verbindlicher Bestandteil, explizit in den Lehr- bzw. Bildungsplänen der neun Bundesländer Bayern, Bremen, Hessen, Nordrhein-Westfalen, Saarland, Sachsen, Sachsen-Anhalt, Schleswig-Holstein und Thüringen wieder (siehe Tabelle 3.4, S. 127). Auch in einigen anderen Bundesländern (Baden-Württemberg, Berlin, Brandenburg, Niedersachen, Rheinland-Pfalz) ist die Behandlung der Masse in der Speziellen Relativitätstheorie im Rahmen der jeweiligen Lehr- bzw. Bildungspläne prinzipiell möglich, jedoch nicht verbindlich oder ausdrücklich als Lerninhalt ausgewiesen.

Neben den Lehr- bzw. Bildungsplänen der Bundesländer wird die schulische Perspektive auf den Massebegriff in der Speziellen Relativitätstheorie sowohl durch das Fachwissen der Physiklehrkräfte als auch durch die von ihnen verwendeten Schullehrbücher repräsentiert. Inwieweit Physiklehrkräfte von der Kontroverse um die Relativität der Masse wissen und ihren Unterricht in dieser Hinsicht gestalten, ist soweit nicht bekannt. Naheliegend ist jedoch die Vermutung, dass sich der fachliche Horizont der Physiklehrkräfte wahrscheinlich vor allem an den entsprechenden Lehr- bzw. Bildungsplänen und Schullehrbuchinhalten orientiert. In einer ausgesprochen kleinen und nicht repräsentativen Stichprobe einiger zufällig ausgewählter Physikschulbücher finden sich, wie in Tabelle 3.5 (S. 129) angeführt, ausschließlich solche, die dem Ansatz 1 mit relativistischer Masse folgen. Dies entspricht auch der Erwartung, dass sich die Inhalte der Schullehrbücher nach denen der Lehr- und Bildungspläne richten. Folglich ist im schulischen Kontext größtenteils mit der Einführung der relativistischen Masse (Ansatz 1) zu rechnen, die nicht vor dem Hintergrund einer bestehenden fachwissenschaftlichen Debatte reflektiert wird.

Tabelle 3.4: Relativistische Masse in den Lehr- bzw. Bildungsplänen (allgemeinbildende Schulen) einiger Bundesländer

Bundesland	Verortung	Fundstelle	Quelle
Bayern	Jahrgangsstufe 11, 11.3 Bewegung geladener Teilchen in Feldern und Einblick in die spezielle Relativitätstheorie	„Massenzunahme bei hochenergetischen Elektronen anhand eines historischen Versuchs (z. B. Bucherer/ Kaufmann)“, „relativistische Masse $E = mc^2$“	Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München (Hrsg.): Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München (Hrsg.) o. D.
Bremen	Leistungskurs: Spezielle Relativitätstheorie	„Relativistische Masse“ (S. 12)	Senatorin für Bildung und Wissenschaft (Hrsg.) 2008: *Physik. Bildungsplan für die Gymnasiale Oberstufe. Qualifikationsphase.* Bremen
Hessen	Leistungskurs (erhöhtes Niveau): Q1.2 Magnetisches Feld	„relativistische Massenzunahme als Phänomen“ (S. 33)	Hessisches Kultusministerium (Hrsg.): Hessisches Kultusministerium (Hrsg.) o. D. Wiesbaden
Nordrhein-Westfalen	Grundkurs: Inhaltsfeld 5, Relativität von Raum und Zeit Leistungskurs: Inhaltsfeld 2, Relativitätstheorie	„Veränderlichkeit der Masse“, „Ruhemasse und dynamische Masse“ (S. 36), „Relativistische Massenzunahmen“ (S. 38)	Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) 2014: *Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Physik.* 1. Auflage. Düsseldorf
Saarland	Grundkurs, Leistungskurs: Felder, Relativistische Betrachtung von Bewegungen	„geben an, dass der Term $\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ die dynamische Masse $m(v)$ eines Teilchens angibt, wobei m_0 die Ruhemasse des Teilchens ist“, „skizzieren den Zusammenhang zwischen der dynamischen Masse eines Teilchens und seiner Geschwindigkeit“, „geben die Einstein’sche Masse-Energie-Äquivalenz an: $W(v) = m(v) \cdot c^2$“ (GK S. 19)	Ministerium für Bildung und Kultur Saarland (Hrsg.) 2019: *Lehrplan Physik. Gymnasiale Oberstufe. Grundkurs. Hauptphase. Erprobungsphase*
Sachsen	Leistungskurs 12: Lernbereich 6, Einblick in die Relativitätstheorie	„Relativität der Masse“ (S. 50)	Sächsisches Staatsministerium für Kultus (Hrsg.): Sächsisches Staatsministerium für Kultus (Hrsg.) o. D. Dresden

Tabelle 3.4: Relativistische Masse in den Lehr- bzw. Bildungsplänen (allgemeinbildende Schulen) einiger Bundesländer (Fortsetzung)

Sachsen-Anhalt	Jahrgangsstufen 11/12, grundlegendes und erhöhtes Anforderungsniveau, Themenbereich: Ausgewählte Gebiete der nichtklassischen Physik, Kompetenzschwerpunkt: Spezielle Relativitätstheorie	„die Abhängigkeit der Masse eines Körpers von seiner Geschwindigkeit begründen und ihre Berücksichtigung bei Beschleunigern erläutern", „die dynamische Masse berechnen und damit Phänomene in Natur und Technik erklären", „relativistische Massenzunahme" (S. 47)	Sachsen-Anhalt, Ministerium für Bildung (Hrsg.) 2019: *Fachlehrplan Gymnasium. Physik*
Schleswig-Holstein	Grundkurs: 12.1 Elektrische Ladung und Felder, ergänzende Inhalte	„In aktuellen Teilchenbeschleunigern (TESLA) bewegen sich Elektronen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit. Statt der Geschwindigkeitsänderung tritt die Änderung der Masse auf." (S. 37)	Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Schleswig Holstein (Hrsg.) 2002: *Lehrplan für die Sekundarstufe II. Gymnasium, Gesamtschule. Physik.* Kiel
Thüringen	Jahrgangsstufe 12, erhöhtes Anforderungsniveau, 4.4 Themenbereich: Spezielle Relativitätstheorie	„Gleichungen für die relativistische Massenänderung, den relativistischen Impuls sowie die relativistische Masse-Energie-Beziehung interpretieren und anwenden", „Experimente und Phänomene zur Bestätigung der relativistischen Massenänderung und der relativistischen Masse-Energie-Beziehung nennen" (S. 41)	Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur (Hrsg.) 2012: *Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife. Physik.* Erfurt

Im Vergleich zwischen der oben beschriebenen Perspektive des Physikunterrichts einerseits und der fachwissenschaftlichen Perspektive einer vorhandenen wissenschaftlichen Kontroverse andererseits (siehe Kapitel 3.2, ab S. 122) wird deutlich, dass ein inhaltlicher Widerspruch besteht, der aus didaktischer Sicht problematisch ist. Insofern soll im folgenden Abschnitt begründet werden, welche Grundsätze im Sinne einer kontroversen Auseinandersetzung mit den Ansätzen 1 und 2 im Physikunterricht berücksichtigt werden sollten.

Tabelle 3.5: Schullehrbücher mit geschwindigkeitsabhängiger Masse $m(v)$ (Ansatz 1)

Ansatz 1 (Pro $m(v)$)
Apolin (2019): *Big Bang 2. Physik Oberstufe*. 1. Auflage. Stuttgart: Ernst Klett Verlag
Blüggel et al. (2019): *Impulse Physik. Oberstufe*. 1. Auflage. Stuttgart, Leipzig: Ernst Klett Verlag
Meyer und Schmidt (2016): *Physik. Gymnasiale Oberstufe*. 2. vollständig überarbeitete Ausgabe. Berlin, Mannheim: Duden Schulbuchverlag
Ackermann et al. (2015): *Fokus Physik. Gesamtband SII*. 1. Auflage. Berlin: Cornelsen
Diehl et al. (2012): *Physik Oberstufe. Qualifikationsphase*. 1. Auflage. Berlin: Cornelsen
Bader (2010), Hrsg.: *Dorn/Bader. Physik. Gymnasium SEK II*. Braunschweig: Schroedel
Weidl (2010): *Mehr Erfolg in Physik. Relativitätstheorie, Quanten-, Atom- und Kernphysik*. München: Mentor-Verlag
Grehn und Krause (2007), Hrsg.: *Metzler Physik. Schülerband SII*. 4. Auflage. Stuttgart: Schroedel
Ebert et al. (1995): *Physik. Sekundarstufe 2. Gesamtband*. 1. Auflage. Berlin: Volk und Wissen
Jupe, Ludwig und Knopf (1995): *Spezielle Relativitätstheorie, Atomphysik (Kursthemen Physik)*. Frankfurt am Main: Diesterweg

3.3.2 Die Relativität der Masse als wissenschaftliche Kontroverse im Physikunterricht

In diesem Abschnitt soll erläutert werden, welchen Leitideen der Physikunterricht bei der Behandlung der Masse in der relativistischen Dynamik folgen sollte. Hierzu wird sich an den in Kapitel 2.4.1 (ab S. 67) erörterten unterrichtlichen Prinzipien bei der Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Kontroversen im Schulunterricht orientiert. Anschließend wird begründet, warum eine inhaltliche Fokussierung auf einen der beiden möglichen Ansätze im Physikunterricht sinnstiftend erscheint. Dabei wird argumentiert, Ansatz 2 im Unterricht den Vorzug zu gewähren.

(1) Kontroversitätsprinzip und Multiperspektivität

Gemäß des Kontroversitätsprinzips müssen Inhalte, die in der Wissenschaft kontrovers sind, auch im Schulunterricht in ihrer Kontroversität dargestellt werden. Daraus folgt für den Physikunterricht, dass die beiden Ansätze 1 und 2 sowie deren fachwissenschaftlicher Status möglichst multiperspektivisch betrachtet werden sollten. Die Sinnhaftigkeit dieser Herangehens-

weise wird über die normative Forderung des Kontroversitätsprinzips hinaus auch durch die beiden folgenden empirischen Untersuchungen unterstrichen.

In einer Studie mit 185 Lehramtsstudierenden (90 im Einführungskurs, 95 im Fortgeschrittenenkurs zur modernen Physik) einer Universität in der Türkei untersuchte Selçuk (2011, vgl. S. 3) das Verständnis von Masse und Dichte in der Speziellen Relativitätstheorie. Nachdem beide Themen sowohl im Einführungs- als auch im Fortgeschrittenenkurs behandelt wurden, nutzte Selçuk einen paper-and-pencil-Fragebogen, der anschließend quantitativ ausgewertet werden konnte. In der Erhebung wurden die Befragten unter anderem mit den folgenden beiden Fragen konfrontiert:

a) Wie viel wiegt eine Frau, deren Körpermasse im unbewegten Zustand 50 kg beträgt, in einem Fahrzeug, das sich mit einer konstanten Geschwindigkeit von 0,6*c* bewegt? (ebd., S. 6)

b) Die Dichte eines Zylinders beträgt im Ruhezustand $2{,}7\, g\, cm^{-3}$. Wie hoch ist die Dichte des Zylinders, gemessen von einem stationären Beobachter auf dem Boden, wenn sich der Zylinder mit $v = 0{,}8c$ in eine Richtung senkrecht zu dessen Kreisflächen bewegt? Erläutern Sie Ihre Antwort ausführlich. (ebd., S. 7)

In den Tabellen 3.6 und 3.7 wird das Antwortverhalten der befragten Studierenden wiedergegeben.

Tabelle 3.6: Ergebnisse zu Frage a) (vgl. Selçuk 2011, S. 6)

	m unverändert	*m* nimmt zu
Einführungskurs	63%	37%
Fortgeschrittenenkurs	91%	9%

Tabelle 3.7: Ergebnisse zu Frage b) (vgl. Selçuk 2011, S. 7)

	m unverändert *V* verkleinert	*m* unverändert *V* unverändert	*m* nimmt zu *V* unverändert
Einführungskurs	30%	33%	37%
Fortgeschrittenenkurs	91%	0%	9%

Auf Frage a) antworteten 37% des Einführungskurses, dass sich die Masse der Frau erhöht und berechneten den Wert für die geschwindigkeitsabhängige Masse gemäß des Zusammenhangs $m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$. Dieselben 37% der Studierenden des Einführungskurses bestätigten ihre Vorstellungen in deren Antworten zu Frage b) (ebd., S. 7). Besonders bemerkenswert ist dabei, dass die Formel für die relativistische Masse nicht in den Universitätskursen der Studierenden verwendet wurde (vgl. ebd., S. 6). Ursache für deren Anwendung könnte ne-

ben dem schulischen Vorwissen der Studierenden auch die Lektüre bestimmter Lehrbücher im Rahmen des Selbststudiums sein. Die Ergebnisse zeigen damit, dass aufgrund des prinzipiellen Vorkommens der beiden Ansätze 1 und 2 innerhalb der Physik nicht ausgeschlossen werden kann, dass Lernende mit beiden Ansätzen in Berührung kommen. Um Lernende dafür zu sensibilisieren und mögliche Irritationen zu vermeiden, erscheint es schon allein deshalb sinnvoll, die Existenz der beiden Massekonzepte zu thematisieren, da nur so auf eine bestehende fachwissenschaftliche Diskussion und den Umgang mit den unterschiedlichen Ansätzen in der Literatur vorbereitet werden kann.

Ähnliche Schlüsse lassen sich aus den Forschungsergebnissen von Ünlü Yavaş und Kizilcik (2016) ziehen, die in einer qualitativen Studie untersuchten, welche Lernschwierigkeiten aus der Perspektive von Studierenden im Bereich der Speziellen Relativitätstheorie auftreten können. Die Autoren der Studie führten dazu eine Fallanalyse mit Physiklehramtsstudierenden (mindestens 6. Semester) durch, um Ursachen für Schwierigkeiten beim Verstehen und Lernen der Speziellen Relativitätstheorie zu identifizieren. Dazu wurden mit den 25 Teilnehmenden der Studie Interviews durchgeführt, die inhaltsanalytisch ausgewertet wurden. Damit ließen sich insgesamt acht Kategorien zu den Lernschwierigkeiten der Studierenden bilden (vgl. ebd., S. 13 ff.). Dabei fassen die Forschenden „Schwierigkeiten, die sich darauf beziehen, ob Masse relativ ist oder nicht“ und damit verbundene „Schwierigkeiten mit widersprüchlichen Quellen“ (ebd., S. 16) in einer gemeinsamen Kategorie zusammen, der beispielsweise die folgenden drei Interview-Zitate zugeordnet wurden:

> Relative mass used to be accepted, now it‘s not. It is hard to understand that. (ebd.)

> The fact that there are two different explanations for the relativity of mass leads to confusion. (ebd., S. 20)

> It seems as if there were two different masses in the (relative) kinetic energy formula. It is very difficult to understand this topic (Relative Energy). (ebd.)

Diese Äußerungen verdeutlichen, dass für Lernende offengelegt werden muss, inwieweit in der Fachliteratur zur Speziellen Relativitätstheorie zwei verschiedene Massekonzepte „parallel“ verwendet werden, um bewusst mit dieser Problematik umgehen zu können und potenzieller Verwirrung der Lernenden vorzubeugen. Einen dementsprechenden Anspruch an Physiklehrende führen auch Bickerstaff und Patsakos (1995, S. 63) an:

> Whatever one´s preference, any serious student of relativity needs to be acquainted with both of the conventions used in the literature and so the teacher who wants to avoid confusion needs to have a clear undestanding of the matter.

Unter diesem Gesichtspunkt sollten auch Schüler auf die Kontroverse um die Relativität der Masse und die Verwendung zweier unterschiedlicher Ansätze im schulischen Physikunterricht vorbereitet werden, da sie mithilfe des Internets bereits selbst auf die beiden verschiedenen Ansätze stoßen können.

Um im Physikunterricht Multiperspektivität bezüglich des Massekonzeptes in der Relativitätstheorie zu realisieren, sollten verschiedene Aspekte der Problematik aus den unterschiedli-

chen Perspektiven der Ansätze 1 und 2 heraus betrachtet werden. Hierzu werden exemplarisch die folgenden Schritte für einen Zugang im Unterricht vorgeschlagen, der Kontroversität berücksichtigt:

1. *Feststellung der Existenz zweier verschiedener Massekonzepte (Ansatz 1 und 2)*:
   Schülern sollte aufgezeigt werden, dass in der Fachliteratur die beiden verschiedenen Ansätze 1 und 2 vorgefunden werden können. Durch eine entsprechende Informiertheit der Schüler kann möglicher Verwirrung, wie sie zum Beispiel Ünlü Yavaş und Kizilcik (2016) herausarbeiten, vorgebeugt werden. Um beide Ansätze zur Masse kennenzulernen, könnten beispielsweise kurze Auszüge aus unterschiedlichen Lehrbüchern der Physik (siehe z. B. Tabelle 3.1, S. 89) miteinander verglichen werden. Ziel ist dabei auch, die Aufgeschlossenheit der Schüler gegenüber unterschiedlichen Fachpositionen zu fördern und die Diversität verschiedener fachinhaltlicher Standpunkte wertschätzen zu lernen.

2. *Einblick in grundlegende inhaltliche Aspekte der beiden Ansätze 1 und 2 gewinnen*:
   Um die beiden Ansätze unterscheiden zu lernen und um zu verstehen, in welchen konkreten Punkten sich die beiden Ansätze 1 und 2 voneinander abgrenzen lassen, sollten die wichtigsten Aussagen bzw. Folgerungen der unterschiedlichen Ansätze gegenübergestellt werden. Hierzu könnte sich an den Inhalten von Tabelle 3.2 (S.100) orientiert werden.

3. *Kontroversität nachvollziehen können*:
   Damit Schüler nachvollziehen können, inwiefern die beiden Ansätze 1 und 2 kontrovers sind, kann im Unterricht eine Auswahl der folgenden Diskussionspunkte (siehe Kapitel 3.1.2, ab S. 101) zumindest teilweise thematisiert werden:

   (2) Analogiebetrachtungen zur Relativität der Zeit (S. 102)

   (3) Relativistische Masse und Gesamtenergie (S. 103)

   (4) Masse als charakteristische Teilcheneigenschaft (S. 105)

   (5) Anwendung nichtrelativistischer Gleichungen (S. 106)

   (8) Masse eines Photons (S. 112)

   (9) Masse eines Systems (Additivität) (S. 114)

   (11) Interpretationen experimenteller Daten (S. 118)

   (12) problematische Vorstellungen (S. 119)

   Dabei sind die gewählten Inhalte entsprechend des Fachwissens der Schüler jeweils adressatengerecht zu elementarisieren (didaktische Rekonstruktion). Im Rahmen einer Auseinandersetzung mit einzelnen Diskussionspunkten auf Schulniveau, könnten die Schüler dabei Argumente analysieren (siehe (2) *Diskutieren und Argumentieren*, S. 133) und Aussagen kritisch reflektieren (siehe (4) *kritische Haltung*, S. 134). Damit Schüler die Kontroversität der Diskussion zur Relativität der Masse besser einschätzen können, ist es hilfreich, verschiedene Merkmale einer wissenschaftlichen Kontroverse (siehe Kapitel 2.1.2, ab S. 24 und Kapitel 3.2, ab S. 122) im Unterricht hervorzuheben.

4. *Akzeptanz beider Ansätze, speziell bei der Leistungsbewertung*:
   Lehrkräfte sollten im Unterricht prinzipiell beiden Ansätzen gegenüber Offenheit zeigen. Speziell bei der Leistungsbewertung dürfen Schülern keine Nachteile durch die Anwendung eines bestimmten Ansatzes entstehen.

(2) Diskutieren und Argumentieren

Im Unterricht sollte die Möglichkeit bestehen, ausgewählte Aspekte der beiden Ansätze 1 und 2 zu diskutieren. So können Schüler Kompetenzen im Argumentieren und Diskutieren erwerben, wenn die Gültigkeit von Argumenten untersucht wird oder die Grenzen bestimmter Aussagen analysiert werden. Eine entsprechende Gelegenheit kann beispielsweise Diskussionspunkt (5) (Anwendung nichtrelativistischer Gleichungen, S. 106) bieten: Die relativistische Masse wird in einigen Lehrbüchern (vgl. z. B. Bader 2010, S. 250; Apolin 2019, S. 464 f.; Ackermann et al. 2015, S. 460 f.) mithilfe eines Stoßprozesses (siehe Beschreibung in Kapitel 3.1.1, Ansatz 1, S. 93) in einem Gedankenexperiment und der Anwendung der newtonschen Beziehung für den Impuls $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ eingeführt. Mit Schülern kann diesbezüglich kritisch reflektiert werden, inwiefern die Annahme des nichtrelativistischen Zusammenhangs $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ hierbei legitim ist[5], um relativistische Zusammenhänge zu verstehen. So können im Rahmen der in Kapitel 3.1.2 (ab S. 101) vorgestellten Diskussionspunkte für Schüler verständliche Argumentationen herausgegriffen werden und fachlich bewertet werden. Darüber hinaus können die verschiedenen Kriterien zur Bewertung der Ansätze 1 und 2 untersucht werden: Spielen in den Diskussionspunkten zum Beispiel Relevanzkriterien, Verständlichkeitskriterien oder Konsistenzkriterien eine Rolle?

Daneben können Schüler ihre Fähigkeiten schulen, physikalische Zusammenhänge logisch und inhaltlich klar darzustellen, wenn sie Argumente in eigenen Worten wiedergeben. Lehrkräfte sollten dabei darauf achten, dass Schüler ihre Aussagen gut begründen, um die Notwendigkeit der Fundierung hervorzuheben. Das Finden einer eigenen persönlichen Meinung und die damit verbundene Positionierung der Schüler zur Verwendung der beiden Ansätze 1 und 2 besitzt für den Physikunterricht an dieser Stelle sicher keine Priorität, da mit der Klärung des eigenen Standpunktes keine besonderen Konsequenzen für die Schüler verknüpft sind.

(3) Informationsklarheit gewinnen

Zur Frage nach der Relativität der Masse können Schüler Sachinformationen recherchieren und beispielsweise verschiedene Fundstellen den unterschiedlichen Ansätzen 1 und 2 zuordnen. Dabei können die jeweiligen Informationsquellen reflektiert und miteinander verglichen werden: Denkbar ist beispielsweise, vorher ausgewählte Abschnitte bzw. Aussagen aus dem Internet, aus Schullehrbüchern, Physiklehrbüchern (universitäres Niveau, das aber auch für Schüler nachvollziehbar sein muss) oder entsprechend verständliche, kurze Auszüge aus wissenschaftlichen Zeitschriftenartikeln gegenüberzustellen und Kriterien für deren Glaubwürdigkeit zu diskutieren (z. B. auch weiterführende Recherchen zum Autor und Einschätzung dessen Expertise).

Wichtig ist unter dem Aspekt der Informationsklarheit aber auch, den Status von Informationen bzw. Wissensbeständen beurteilen zu können. Die Einordnung von Aussagen als „sicher“,

[5] Relativistisch gilt $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ nicht - außer man verwendet die relativistische Masse für m.

„ungewiss“, „ungenau“ oder „ungeklärt“ hilft den Schülern, sich in der Kontroverse zu orientieren und Erkenntnisgrenzen genauer fassen zu können. So kann hinsichtlich der Kontroverse um die Relativität der Masse im Unterricht zum Beispiel thematisiert werden, dass auch physikalische Experimente zur Bestimmung der Masse schnell bewegter Teilchen keinem der beiden Ansätze widersprechen. Empirische Befunde können an dieser Stelle keine Informationen zur Klärung der Problemfrage liefern, da die experimentellen Ergebnisse unterschiedlich interpretiert werden können (siehe Kapitel 3.1.2, Diskussionspunkt (11), S. 118).

(4) kritische Haltung

Für die Vermittlung einer grundsätzlich kritischen Haltung sollte die Lehrkraft die Schüler animieren, Aussagen und Argumente zu hinterfragen. Eine Möglichkeit hierzu wurde bereits im Abschnitt (2) *Diskutieren und Argumentieren* (S. 133) vorgeschlagen (Kann die newtonsche Gleichung $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ für den relativistischen Impuls genutzt werden?). Weitere Lerngelegenheiten bietet aber auch der Vergleich unterschiedlicher Quellen, wie bereits im Punkt (3) *Informationsklarheit gewinnen* (S. 134) beschrieben wurde. Die Quellen können beispielsweise auch im Hinblick auf die folgenden Gesichtspunkte kritisch hinterfragt werden:

- Welche Belege (Evidenz) werden von den Autoren zur Stützung ihrer Aussagen und Argumente vorgebracht?
- Nennen die Autoren die Limitationen ihrer Aussagen und Schlussfolgerungen?
- Werden von den Autoren auch Gegenargumente einbezogen?

(5) Bewertungsstrukturwissen

Für die Reflexion des eigenen Bewertungsprozesses bei der Auseinandersetzung mit der Kontroverse zur Relativität der Masse eignet sich der Urteilskreislauf (Knittel und Mikelskis-Seifert 2013, S. 24) aus Kapitel 2.4.1 (S. 77):

1. Beschreibung der Problemsituation
2. Nennung der möglichen Entscheidungsoptionen
3. Begründung der einzelnen Entscheidungsoptionen (Für und Wider)
4. Gewichtung und Abwägung dieser Begründungen
5. eigene Entscheidung und Begründung
6. Folgenabschätzung der gewählten Entscheidungsoption

Gemeinsam können die einzelnen Schritte des Kreislaufes mit den Schülern im Physikunterricht nachvollzogen werden (Wie wurden die Schritte praktisch umgesetzt/durchgeführt?). Danach kann der Stand des eigenen Urteilsprozesses verortet werden: Bis zu welchem Urteilsschritt ist man im Unterricht vorgedrungen (z. B. bis Schritt 3 oder womöglich sogar Schritt 4)? Da anzunehmen ist, dass die Problematik der Relativität der Masse im Unterricht anspruchsvoll ist, so dass der Urteilsprozess voraussichtlich nicht in Gänze durchlaufen werden kann,

sollte mit den Schülern auch der Frage nachgegangen werden, warum der Urteilsprozess nur bis zu einem bestimmten Schritt gelangen konnte.

(6) *Nature of Science* thematisieren

Wissenschaftliche Kontroversen bieten eine besondere Gelegenheit *Nature-of-Science*-Aspekte zu thematisieren. Im Zusammenhang mit dem Diskurs zur Relativität der Masse könnten insbesondere die folgenden konkreten *Nature-of-Science*-Aspekte Beachtung finden:

- Beobachtungen, empirische Daten sind interpretationsbedürftig bzw. theoriegeladen (vgl. Lederman et al. 2002, S. 499 f.; McComas und Olson 1998, S. 45)
- Vorläufigkeit: wissenschaftliches Wissen ist nicht immer eindeutig oder sicher (vgl. Lederman et al. 2002, S. 502)
- Aushandlungsprozesse sind Bestandteil wissenschaftlicher Praxis (vgl. Osborne et al. 2003, S. 704)
- Wissenschaft hat inhärente Grenzen (vgl. McComas und Olson 1998, S. 44)

Die von der Lehrkraft gewählten Schwerpunkte sollten stets expliziter Unterrichtsinhalt sein. Automatisch erfüllt die Kontroverse zur Relativität der Masse die Ansprüche an Authentizität und Fachintegration (siehe Kapitel 2.4.1, S. 78). Die *Nature-of-Science*-Aspekte müssen dem Niveau der Schüler angepasst elementarisiert werden und sollten reflexiv im Unterricht eingebunden werden. Dies könnte mithilfe der folgenden Fragen an die Schüler realisiert werden:

- Welche Rolle spielt die Interpretation experimenteller Daten in der Wissenschaft?
- Gibt es in der Naturwissenschaft immer sichere, eindeutige Erkenntnisse?
- Wie unterscheidet sich dieses Unterrichtsthema (Relativität der Masse) von anderen Themen der Physik?
- Wie verändert die Auseinandersetzung mit der Kontroverse zur Relativität der Masse dein Verständnis von Wissenschaft?

Den Schülern könnten auch konkrete *Nature-of-Science*-Aspekte vorgegeben werden mit der Aufgabe, zu erläutern, inwiefern bzw. an welcher Stelle sich diese Aspekte in den Unterrichtsinhalten widerspiegeln.

Inhaltliche Fokussierung auf Ansatz 2 (ohne relativistische Masse)

Neben der kontroversen Darstellung der Thematik im Physikunterricht empfiehlt sich *ergänzend* (z. B. anschließend) aus Gründen der Praktikabilität eine inhaltliche Fokussierung auf genau einen der beiden Ansätze. Dies hat den Vorteil, im Unterricht Komplexität zu reduzieren und durch konsistente Verwendung eines einzelnen Ansatz Unklarheiten und Lernschwierigkeiten bei den Schülern zu vermeiden. Wichtig wird dies beispielsweise, wenn Berechnungen im Bereich der relativistischen Dynamik durchgeführt (Formulierung von Rechenwegen)

oder physikalische Erklärungen, wie die Begründung der Lichtgeschwindigkeit als Obergrenze für bewegte Objekte oder die Lichtablenkung durch Gravitationsfelder (Haben Photonen eine Masse?) nachvollzogen werden. Schüler müssen im Unterricht (auch bei Folgethemen, z. B. Quantenphysik) wissen, was eine Lehrkraft meint, wenn von „Masse“ gesprochen wird (Ruhemasse oder relativistische Masse). Deshalb wird empfohlen, den Physikunterricht nach der Auseinandersetzung mit der Kontroversität der Thematik entlang eines einzelnen Ansatzes auszurichten. Diese Idee ist auch damit verträglich, dass Lehrkräfte aufgrund der prinzipiellen Unmöglichkeit von Neutralität ihren persönlichen Standpunkt im Unterricht vertreten können (siehe Kapitel 2.4.1, S. 71), wobei diese Positionierung an sich sowie die dafür ausschlaggebenden Beweggründe transparent gemacht werden müssen.

Aus didaktischer Sicht sprechen hauptsächlich drei Argumente dafür, hierbei Ansatz 2 im Unterricht zu bevorzugen und somit auf die Weiterverwendung des Konzeptes der relativistischen Masse zu verzichten:

- In der Fachwelt der Physiker zeichnet sich vermutlich eine Tendenz zu Ansatz 2 ab (siehe Kapitel 3.1.1, S. 92 und Kapitel 3.1.2, Diskussionspunkt (10), S.115). Damit die in der Schule vermittelten Inhalte anschlussfähig bleiben, erweiterbar sind und Umlernprozesse (z. B. bei entsprechender Bildungslaufbahn an der Universität) vermieden werden können (vgl. Kircher 2015, S. 112), sollte auch der Physikunterricht an Ansatz 2 ausgerichtet werden.

- Ansatz 1 könnte die unangemessene Vorstellung provozieren, dass auch die (Ruhe-)Masse eines Objektes mit der Geschwindigkeit zunimmt (siehe Kapitel 3.1.2, Diskussionspunkt (12), S. 119). Eine zusätzliche Herausforderung ist die Verwendung zweier verschiedener Massebegriffe in diesem Ansatz (Ruhemasse und relativistische Masse), wodurch Unklarheiten bedingt werden könnten. Um diese Probleme zu umgehen, sollte Ansatz 1 nicht weiter im Unterricht verfolgt werden.

- Wie in Diskussionspunkt (3) in Kapitel 3.1.2 (S. 103) beschrieben, ist die relativistische Masse keine fundamentale oder notwendige Größe in der Relativitätstheorie. Insofern scheint sie auch im Physikunterricht entbehrlich, da aufgrund begrenzter Zeitkontingente vor allem die Vermittlung wesentlicher Kernideen einer physikalischen Theorie priorisiert werden sollte.

Damit Schüler die Einschränkung auf einen Ansatz im Unterricht verstehen und einsehen können, ist es essentiell, dass Lehrkräfte diese Entscheidung transparent darstellen. Hierzu kann einerseits zum Beispiel auf die Argumente in den Diskussionspunkten (3), (4), (5) und (12) (siehe Kapitel 3.1.2, ab S. 101) zurückgegriffen werden, um die Verwendung des Ansatzes 2 gegenüber den Schülern zu rechtfertigen. Ergänzend können die Ergebnisse der Literaturanalyse von Oas (2008) (siehe Kapitel 3.1.1, S. 91 f.) genutzt werden, um auf einen Trend zu Ansatz 2 in der Physik hinzuweisen, dem man auch im Physikunterricht folgen will.

Bei Verwendung des Ansatzes 2 im Physikunterricht, also dem Verzicht auf das Konzept der relativistischen Masse, sollten Lehrkräfte die folgenden zentralen Punkte bzw. Ideen bei der Konzeption und Durchführung des Unterrichts besonders berücksichtigen:

- *sprachliche Klarheit*:
  Es sollte ausschließlich von „Masse“ gesprochen werden, womit die invariante Masse bzw. die Ruhemasse eines Objektes gemeint ist. Die Begriffe „relativistische Masse“ und „Ruhemasse“ werden nicht verwendet.

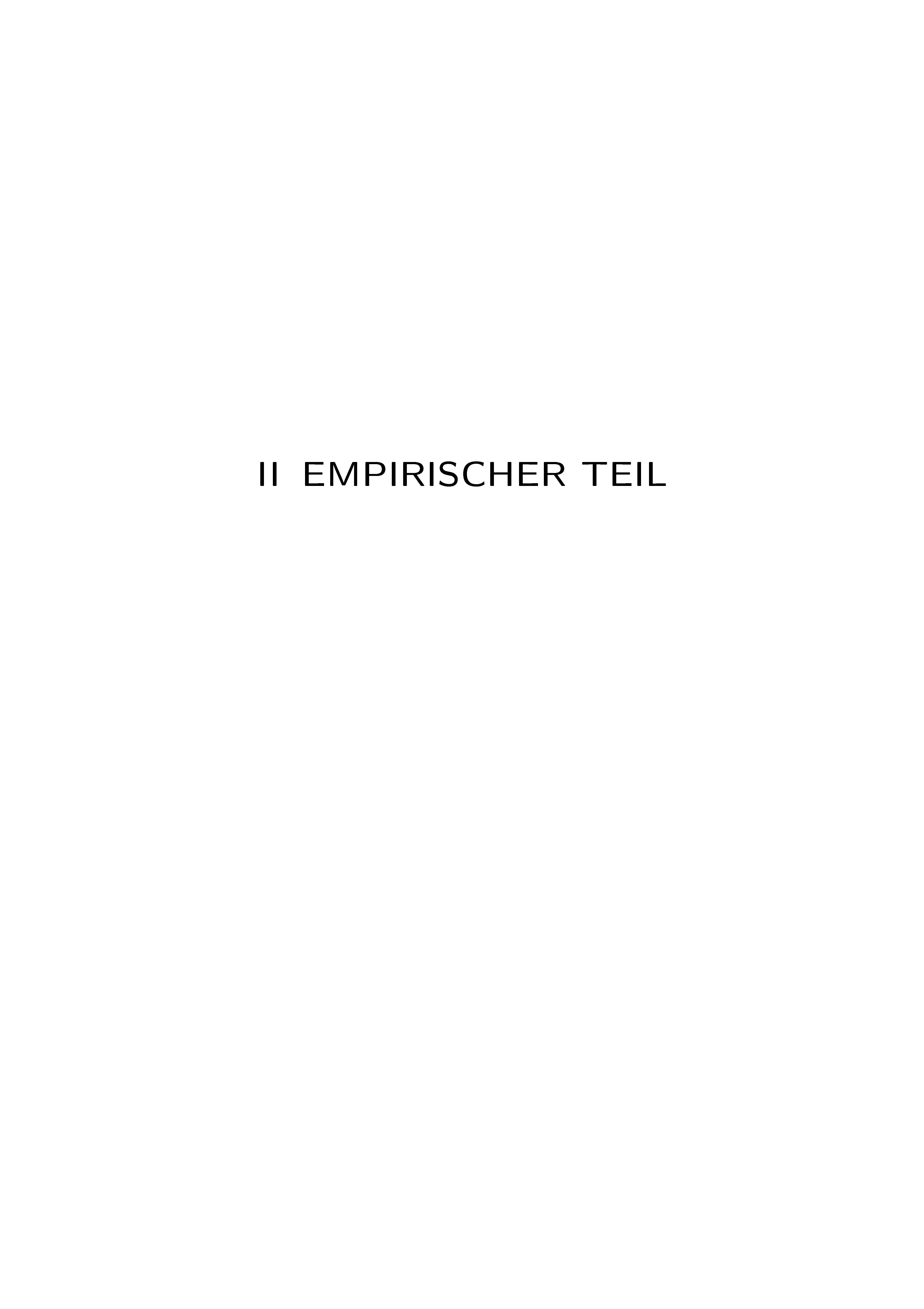
- *Wesen der Masse*:
  Masse ist eine Energieform, sie entspricht der Ruheenergie (also der inneren Energie) $E_0 = mc^2$ eines Objektes (vgl. Adler 1987, S. 742; Bickerstaff und Patsakos 1995, S. 65; Leong und Chin 2005, S. 62; Ogborn 2005, S. 221). Dementsprechend kann sie in andere Energieformen umgewandelt werden (z. B. bei der Annihilation eines Elektrons mit einem Positron: die Ruhenergien der beiden Ausgangsteilchen werden in kinetische Energie der entstehenden Photonen umgewandelt). Die Masse unterscheidet sich von der Gesamtenergie $E = \gamma mc^2$ wie folgt: Masse ist eine invariante Größe, jedoch keine Erhaltungsgröße. Die Gesamtenergie ist eine Erhaltungsgröße[6], jedoch nicht invariant.

- *Notation und Bedeutung der Masse-Ruheenergie-Äquivalenz*:
  In der Gleichung $E_0 = mc^2$ für die Äquivalenz von Masse und Ruheenergie sollte stets der Index „0“ die Ruheenergie E_0 kennzeichnen, um eine bessere Unterscheidbarkeit zur Gesamtenergie E zu ermöglichen. Der Zusammenhang ist nicht mit $E = \gamma mc^2$ zu verwechseln. Darum plädiert Embacher (2010, vgl. S. 222) dafür, die genauere Bezeichnung „Äquivalenz von Masse und <u>Ruhe</u>energie“ an Stelle von „Äquivalenz von Masse und Energie“ zu nutzen. Ruheenergie und Masse sind proportional zueinander. Das heißt, erhöht (verringert) man die Ruheenergie eines Objektes, so erhöht (verringert) sich auch die Masse dieses Objektes und umgekehrt. Es ist nicht so, dass im Sinne einer „ineinander Umwandlung“ eine der beiden Größen erschaffen wird, während die andere vernichtet wird (vgl. Leong und Chin 2005, S. 58; siehe dazu auch Bickerstaff und Patsakos 1995, S. 65).

- *Notation des relativistischen Impulses*:
  Um hervorzuheben, dass der Lorentzfaktor γ in der Gleichung des relativistischen Impulses nicht mit der Masse assoziiert ist, kann die Gleichung für den Impuls in der Form $\mathbf{p} = m \cdot \gamma \mathbf{v}$ notiert werden.

Eine solche inhaltliche Fokussierung auf den Ansatz 2 darf nicht als Widerspruch zur Kontroversität der Thematik der Masse in der Relativitätstheorie missverstanden werden. Die inhaltliche Fokussierung sollte immer in Kombination mit den oben beschriebenen Leitideen zur Umsetzung von Kontroversität verstanden werden. Kontroversität wird in diesem Sinne nicht durch eine inhaltliche Fokussierung ersetzt, sondern ergänzt. Physikunterricht kann damit sowohl der Kontroversität der Thematik gerecht werden, als auch den Ansprüchen des Fachs an inhaltliche und formale Stringenz genügen.

[6] Der Wert einer Erhaltungsgrößen ist in einem beliebigen, aber fest gewählten Bezugssystem nach einer Wechselwirkung identisch mit dem Wert vor dieser Wechselwirkung (vgl. Tipler und Llewellyn 2010, S. 89).



II EMPIRISCHER TEIL

4 Zielsetzung und Forschungsfragen

4.1 Ableitung der Ziele für die empirische Untersuchung

In diesem Kapitel werden die Forschungsziele der vorliegenden Arbeit formuliert und daraus Forschungsfragen für eine empirische fachdidaktische Untersuchung abgeleitet.

Wie im Kapitel 2.2 (ab S. 34) beschrieben wurde, besitzen wissenschaftliche Kontroversen für den Physikunterricht einen besonderen Bildungswert, der schwerpunktmäßig in den Bereichen Erkenntnisgewinnungskompetenz (insbesondere *Nature of Science*) und Kommunikationskompetenz liegt. Die Realisierung dieses Bildungswertes ist abhängig von der konkreten Gestaltung des Physikunterrichts und damit von der Lehrkraft, die diesen Unterricht konzipiert und umsetzt. Jedoch sind Erkenntnisse der Physikdidaktik zum Umgang von Physiklehrkräften mit wissenschaftlichen Kontroversen und der Nutzung deren Bildungswertes bisher ein Forschungsdesiderat (siehe Kapitel 2.3.3, ab S. 61, Kapitel 2.4.1, ab S. 67 und Kapitel 2.4.2, ab S. 79). Damit ergibt sich das übergeordnete physikdidaktische Forschungsziel:

> *Es soll untersucht werden, wie (angehende) Physiklehrkräfte mit wissenschaftlichen Kontroversen, die für den Physikunterricht relevant sind, umgehen und inwiefern sie deren Bildungswert nutzen.*

Diese allgemeine Zielstellung soll nicht nur im Hinblick auf Physiklehrkräfte, sondern auch auf Physiklehramtsstudierende verfolgt werden, da sich beide Gruppen hinsichtlich wichtiger Merkmale unterscheiden. Zum einen könnte ein Vergleich dieser Gruppen Unterschiede aufgrund bestimmter Unterscheidungsfaktoren wie zum Beispiel dem Alter, der Unterrichtserfahrung oder vorhandener themenspezifischer Fachkenntnisse offenlegen. Andererseits könnten durch den vergleichenden Einbezug beider Gruppen möglicherweise Erkenntnisse gewonnen werden, die sowohl für die erste Phase der Lehrerbildung an den Universitäten, als auch für die dritte Phase der Lehrerbildung (Lehrkräftefort- und Lehrkräfteweiterbildung) von Bedeutung sind. Schlussfolgerungen, die sich aus dieser Erforschung ableiten lassen, könnten Fragen der Gestaltung von Physikunterricht und der Vorbereitung von (zukünftigen) Physiklehrkräften auf den Umgang mit Kontroversität in der Wissenschaft betreffen. Insofern erscheint es sinnvoll, neben Physiklehrkräften auch Physiklehramtsstudierende (als zukünftige Lehrkräfte) in die Untersuchung einzuschließen, um Aspekte der Aus- und Fortbildung von Lehrkräften berücksichtigen zu können.

Die oben genannte übergeordnete Zielstellung der vorliegenden Forschungsarbeit enthält im Wesentlichen zwei Teilziele, die nun wie folgt formuliert werden können:

Ziel 1: *Es soll untersucht werden, wie Physiklehrkräfte und Physiklehramtsstudierende mit wissenschaftlichen Kontroversen, die für den Physikunterricht relevant sind, umgehen.*

Ziel 2: *Es soll untersucht werden, inwiefern Physiklehrkräfte und Physiklehramtsstudierende den Bildungswert wissenschaftlicher Kontroversen für den Physikunterricht nutzen können.*

Darüber hinaus ist aufgrund der bestehenden Unterschiede zwischen Physiklehrkräften und Physiklehramtsstudierenden auch der Vergleich dieser beiden Gruppen ein Untersuchungsziel:

Ziel 3: *Es soll untersucht werden, inwiefern Unterschiede zwischen Physiklehrkräften und Physiklehramtsstudierenden im Umgang mit wissenschaftlichen Kontroversen und der Nutzung deren Bildungswertes bestehen.*

In Bezug auf die ersten beiden Ziele kann sich die Strukturierung des Forschungsvorhabens am Modell des Entscheidens nach Betsch, Funke und Plessner (2011, vgl. S. 75) orientieren, da die Konfrontation mit einer wissenschaftlichen Kontroverse (zukünftige) Physiklehrkräfte zu der Frage führt, wie die kontroverse Thematik im Unterricht dargestellt werden soll. Damit liegt für die (zukünftigen) Physiklehrkräfte eine fachliche und fachdidaktische Entscheidungssituation vor. Die damit verbundenen Entscheidungsprozesse und Urteile, die innerhalb dieser Prozesse getroffen werden, können mithilfe des Rahmenmodells für den Prozess des Entscheidens erfasst werden (siehe Kapitel 2.4, ab S. 67). Daraus folgt eine Präzisierung des ersten Forschungszieles:

Ziel 1: *Es soll untersucht werden, wie Physiklehrkräfte und Physiklehramtsstudierende mit einer wissenschaftlichen Kontroverse als Entscheidungssituation hinsichtlich der Darstellung des Fachinhaltes im eigenen Unterricht umgehen.*

4.2 Forschungsfragen

Ausgehend von den oben genannten Zielstellungen werden an dieser Stelle die Forschungsfragen dieser Arbeit dargelegt. Abbildung 4.1 (S. 145) zeigt, wie sich die angegebenen Forschungsfragen im Modell des Entscheidungsprozesses verorten lassen.

Forschungsfragen in Bezug auf Forschungsziel 1:
Eine wissenschaftliche Kontroverse als Entscheidungssituation für Lehrkräfte

Um zu untersuchen, wie Physiklehrkräfte und Physiklehramtsstudierende mit einer wissenschaftlichen Kontroverse als Entscheidungssituation hinsichtlich der Darstellung im Unterricht umgehen, wird das Rahmenmodell für den Prozess des Entscheidens nach Betsch, Funke und Plessner (2011, vgl. S. 75) herangezogen. In dessen präselektionaler Phase findet zunächst die Informationssuche und Analyse der möglichen Handlungsoptionen statt (siehe Abbildung 2.1, S. 85). Im Hinblick auf diese Auseinandersetzung mit den verschiedenen Positionen einer wissenschaftlichen Kontroverse kann Forschungsfrage FF 1.1 aufgestellt werden:

FF 1.1 *Wie gehen Physiklehrkräfte und Physiklehramtsstudierende mit einer wissenschaftlichen Kontroverse um, wenn sie mit Diskussionspunkten und Argumentationen dieser Kontroverse konfrontiert werden?*

Über die präselektionale Phase hinaus spielen bestimmte individuelle Kriterien bei der Bewertung von Informationen während der Auseinandersetzung mit einer wissenschaftlichen Kontroverse auch eine Rolle für die eigentliche Entscheidung in der selektionalen Phase. Solche Bewertungskriterien können Aufschluss über zentrale Aspekte des Entscheidungsprozesses geben, da sie einen Einblick darin gewähren, welche Informationen aus welchen Gründen wichtig für die Lehrkräfte und Studierenden sind. Somit ergibt sich die folgende Forschungsfrage:

FF 1.2 *Welche Bewertungskriterien nutzen Physiklehrkräfte und Physiklehramtsstudierende im Prozess der Entscheidung über die Art der Darstellung eines kontroversen Fachinhaltes im Physikunterricht?*

Forschungsfragen in Bezug auf Forschungsziel 2:
Nutzung des Bildungswertes einer wissenschaftlichen Kontroverse

Wie in Kapitel 2.4.1 (ab S. 67) verdeutlicht wurde, sind eine Reihe unterschiedlicher Prinzipien für die Gestaltung des Unterrichts zu wissenschaftlichen Kontroversen zu empfehlen, um den Bildungswert wissenschaftlicher Kontroversen für den Physikunterricht nutzen zu können. Inwiefern Physiklehrende diese Prinzipien tatsächlich berücksichtigen, wenn sie sich einem kontroversen Fachinhalt im Zusammenhang mit dem Schulunterricht gegenübergestellt sehen, wurde bisher nicht in der Physikdidaktik erforscht. Die damit verbundene Entscheidung der Lehrenden für eine konkrete Darstellung eines kontroversen Fachinhaltes im Unterricht (Handlungsintention) sowie die anschließende Umsetzung dieser Handlungsabsicht im Unterricht (Handlungsmöglichkeiten) sind daher von Interesse, um beurteilen zu können, inwiefern eine Realisierung des Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen stattfinden

kann. Im Hinblick auf die selektionale und die postselektionale Phase im Rahmenmodell des Entscheidungsprozesses werden dazu die folgenden beiden Forschungsfragen formuliert:

FF 2.1 a) *Welche Handlungsintentionen äußern Physiklehrkräfte und Physiklehramtsstudierende bei der Konfrontation mit einer wissenschaftlichen Kontroverse im Unterrichtskontext?*

FF 2.1 b) *Welche Handlungsmöglichkeiten äußern Physiklehrkräfte und Physiklehramtsstudierende bei der Konfrontation mit einer wissenschaftlichen Kontroverse im Unterrichtskontext?*

Wissenschaftliche Kontroversen eignen sich insbesondere zur Thematisierung von *Nature-of-Science*-Aspekten im Unterricht und stellen damit eine Gelegenheit dar, unangemessenen Schülervorstellungen zu *Nature-of-Science* zu begegnen (siehe Kapitel 2.3.2, ab S. 54). Dabei sind Schüler in ihrem Lernprozess auf die Unterstützung durch Lehrkräfte angewiesen. Vermutlich spielt dabei auch das eigene *Nature-of-Science*-Verständnis der Lehrkräfte eine Rolle (siehe Kapitel 2.3.3, ab S. 61). Inwiefern Physiklehrkräfte das Potenzial wissenschaftlicher Kontroversen im Bereich von *Nature of Science* im Unterricht entfalten können, ist soweit nicht untersucht worden. Aufgrund der besonderen Bedeutung der Lehrenden bei der Nutzung einer wissenschaftlichen Kontroverse als *Nature-of-Science*-Lerngelegenheit im Physikunterricht sollen die nachstehenden Forschungsfragen untersucht werden:

FF 2.2 a) *Welche Nature-of-Science-Vorstellungen von Physiklehrkräften und Physiklehramtsstudierenden können bei der Auseinandersetzung mit einer wissenschaftlichen Kontroverse rekonstruiert werden?*

FF 2.2 b) *Welche Nature-of-Science-Aspekte werden von Physiklehrkräften und Physiklehramtsstudierenden im Zusammenhang mit einer wissenschaftlichen Kontroverse im Unterrichtskontext thematisiert?*

Forschungsfrage in Bezug auf Forschungsziel 3:
Vergleich von Physiklehrkräften und Physiklehramtsstudierenden

Da sich Physiklehrkräfte und Physiklehramtsstudierende hinsichtlich wichtiger Merkmale, wie Alter, Vorwissen, Praxiserfahrung und Ausbildungsstand insgesamt unterscheiden, sollten die damit verbundenen, möglicherweise verschiedenen Perspektiven dieser beiden Gruppen miteinander verglichen werden. Hierzu wird Forschungsfrage FF 3 aufgestellt:

FF 3 *Welche Unterschiede zwischen Physiklehrkräften und Physiklehramtsstudierenden bestehen im Hinblick auf die oben genannten Forschungsfragen?*

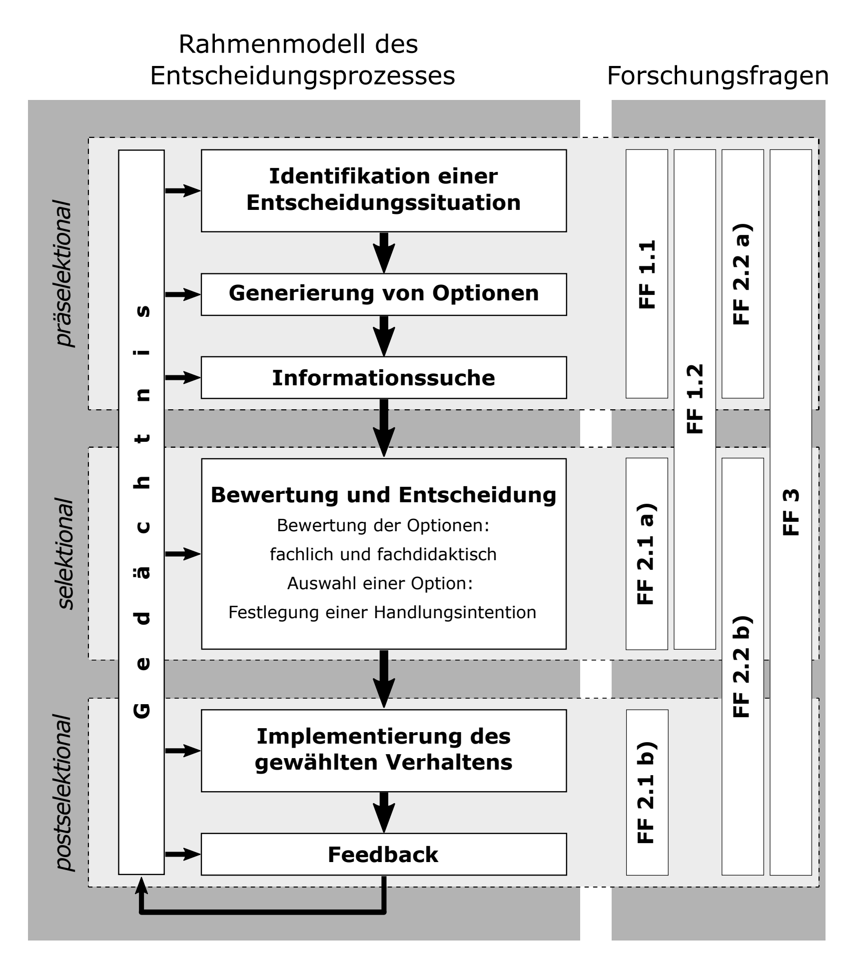


Abbildung 4.1: Verortung der Forschungsfragen im Rahmenmodell des Entscheidungsprozesses nach Betsch, Funke und Plessner (2011, vgl. S. 75)

5 Forschungsdesign und Auswertungsmethode

5.1 Grundlegende Überlegungen zum Design

Explorative qualitative Studie

Für die Untersuchung der in Kapitel 4 (ab S. 141) genannten Forschungsfragen, wurden in einer explorativen qualitativen Studie Physiklehrkräfte und Physiklehramtsstudierende befragt. Da bisher nur wenige empirische fachdidaktische Erkenntnisse zum Umgang von Lehrkräften mit wissenschaftlichen Kontroversen vorliegen (siehe Kapitel 2.3.3, ab S. 61 und Kapitel 2.4.2, ab S. 79), wurde ein offenes qualitatives Forschungsdesign verwendet, um ohne vorzeitige Einengung der Untersuchungsperspektive möglichst tiefgründige Einblicke in Bezug auf die Forschungsfragen gewinnen zu können. Gerade im Hinblick auf die beiden Forschungsfragen FF 2.2 a) und b) ist ein qualitatives Format hierzu besonders geeignet (vgl. Sadler, Chambers und Zeidler 2004, S. 389), wie in Kapitel 5.2 (ab S. 150) noch genauer begründet wird.

Konzeption als Laborstudie

Die vorliegende empirische Studie entspricht ihrem Charakter nach einer Laborstudie. Dies erlaubt die systematische Kontrolle (vgl. Schecker, Parchmann und Krüger 2018, S. 3; Aufschnaiter 2014, S. 81, 84) einiger wichtiger Bedingungen und Einflussfaktoren, die für den Entscheidungsprozess relevant sein könnten. Da gemäß des Rahmenmodells für den Prozess den Entscheidens die in der präselektionalen Phase rezipierten Informationen einen maßgeblichen Einfluss auf die Entscheidungsfindung nehmen, ist es günstig, diese Informationen im Erhebungsdesign zu kontrollieren. In diesem Sinne kann gleichzeitig eine Reduzierung der Komplexität (vgl. ebd., S. 84) des Untersuchungskontextes erreicht werden, so dass für die Befragten die Auseinandersetzung mit einer vorgegebenen wissenschaftlichen Kontroverse hinreichend abgeschlossen und vor allem inhaltlich bewältigbar gestaltet werden kann. Im Zuge einer Beschränkung der Faktoren, die sensitiv auf die Entscheidungsfindung wirken könnten, wurde die Erhebung so weit wie möglich unabhängig vom Versuchsleiter durchgeführt. Die an der Studie teilnehmenden Lehrkräfte und Studierenden erhielten deshalb ein Materialpaket mit ausgewählten Fachinformationen zu einer wissenschaftlichen Kontroverse sowie den Erhebungsinstrumenten und allen notwendigen Instruktionen zum Ablauf der Untersuchung. Mit diesen Materialien konnten sich die Teilnehmenden selbstständig und allein auseinandersetzen, so dass eine Interaktion mit dem Versuchsleiter oder anderen Befragten vermieden wurde. Neben diesen Vorteilen zur Erhöhung der Vergleichbarkeit der erhobenen Daten eignet sich das Laborsetting insbesondere zur Erforschung von Denkprozessen (vgl. ebd.) und damit zur Erfassung einiger wichtiger Aspekte des Entscheidungsprozesses bei der Konfrontation mit einer wissenschaftlichen Kontroverse unter einem vorgegebenen Informationsrahmen.

Exemplarischer Untersuchungskontext

Die Umsetzung der Forschungsziele bedarf einer konkreten wissenschaftlichen Kontroverse, die exemplarisch als Untersuchungskontext dienen kann. Die notwendige Verwendung eines solchen Kontextes wird durch die folgenden beiden Punkte begründet:

- Um (zukünftige) Physiklehrkräfte entsprechend der Forschungsfragen mit einer Entscheidungssituation konfrontieren zu können, die einen Entscheidungsprozess initiiert, wie das Rahmenmodell des Entscheidens nach Betsch, Funke und Plessner (2011, vgl. S. 75) abbildet, wird eine konkrete physikalische Thematik benötigt. Damit der Entscheidungsprozess möglichst vollständig von den (zukünftigen) Lehrkräften durchlaufen werden kann, erscheint es sinnvoll, dass sich die Auseinandersetzung auf eine einzige wissenschaftliche Kontroverse beschränkt, die insofern exemplarisch ist. So kann trotz der Komplexität kontroverser Themen eine hinreichend tiefgründige Auseinandersetzung der Lehrkräfte mit einer wissenschaftlichen Kontroverse erreicht werden.

- Im Rahmen der Forschungsfragen FF 2.2 a) und b) ist die Rolle von *Nature-of-Science*-Vorstellungen und -Aspekten von Interesse. Zu deren Erfassung sind unterrichtsrelevante Kontexte günstig (vgl. z. B. Nott und Wellington 1996, Guerra-Ramos 2012; siehe dazu auch Kapitel 5.2, ab S. 150).

Als konkreter Untersuchungskontext wurde die Kontroverse um den Massebegriff in der Speziellen Relativitätstheorie, wie sie in Kapitel 3 (ab S. 87) ausführlich beschrieben wurde, gewählt. Die Auswahlkriterien und Vorzüge dieser Kontroverse sind vor allem:

- *Relevanz für den Physikunterricht*:
  Die Kontroverse zur Relativität der Masse ist für Lehrkräfte relevant, da es sich um ein potenzielles Unterrichtsthema handelt (siehe Tabelle 3.4, S. 127; Pflichtthema in Sachsen). Bedeutsam ist die Problematik darüber hinaus, weil die Masse als physikalische Grundgröße ein wichtiger Begriff und Gegenstand des Physikunterrichts ist.

- *Umfang und Anspruchsniveau*:
  Im Sinne nicht zu hoher Komplexität sollte der Untersuchungskontext inhaltlich hinreichend abgrenzbar und geschlossen sein. Die fachlichen Aspekte sind für Lehrkräfte verständlich und nachvollziehbar (Berücksichtigung des Vorwissens der Lehrkräfte) darzustellen. Dass die genannten Gesichtspunkte erfüllt werden können, zeigen die in Kapitel 3.1.2 (ab S. 101) beschriebenen Diskussionspunkte und Argumente zur Frage der Relativität der Masse.

- *Aktualität*:
  Venturini (2010, S. 264) empfiehlt bei der Auswahl einer für Studienzwecke geeigneten Kontroverse die Aktualität des kontroversen Themas zu berücksichtigen, um Interesse für die Inhalte zu wecken. Dieses Kriterium sollte die Kontroverse um die relativistische Masse erfüllen, da es sich für Lehrkräfte nicht um eine geklärte Problemstellung handeln dürfte. Dazu kann das Schema zur „Weitergabe und Nutzung wissenschaftsbezogener Information“ nach Marks, Stuckey und Eilks (2014, S. 25) herangezogen werden (siehe



Abbildung 5.1: Weitergabe und Nutzung wissenschaftsbezogener Information (Marks, Stuckey und Eilks 2014, S. 25, Abb. 3)

Abbildung 5.1). Es illustriert, wie sich Erkenntnisse der Wissenschaft auch in der Gesellschaft etablieren. Unabhängig von der Frage, wie aktuell die Kontroverse zur Relativität der Masse heute unter den Experten ist, kann festgehalten werden, dass Physiklehrbücher prinzipiell unterschiedliche Fachpositionen widerspiegeln (siehe Tabelle 3.1, S. 89) und der Vergleich von Schullehrbüchern keinerlei Hinweise auf die Kontroverse zur Relativität der Masse zeigt (siehe Tabelle 3.5, S. 129). Darum ist anzunehmen, dass diese Kontroverse für Lehrkräfte entweder noch nicht besteht, so dass sie „unvorbelastet" damit konfrontiert werden können, zumindest aber, dass die Kontroverse für Lehrkräfte kein gelöstes Problem ist.

- *Herausforderung der eigenen Position*:
  Entsprechend der Überlegung im vorigen Punkt ist davon auszugehen, dass Lehrkräfte bisher mehrheitlich nicht mit der Kontroverse um die relativistische Masse in Berührung gekommen sind. Dies scheint plausibel, da Härtig, Kauertz und Fischer (2012, vgl. S. 198) angeben, dass vor allem Schullehrbücher und der Lehr- bzw. Bildungsplan wichtige Informationsquellen für Lehrkräfte sind. Aufgrund der Neuheit der Thematik wird die Kontroverse als subjektiv herausfordernd (siehe Kapitel 2.1.2, S. 30, Merkmal (7)) durch die Lehrkräfte wahrgenommen werden können.

Am Beispiel der Kontroverse um den Massebegriff in der Speziellen Relativitätstheorie wurde deshalb analysiert, wie Physiklehrkräfte und Physiklehramtsstudierende mit fachwissenschaftlichen Kontroversen umgehen.

5.2 Wahl der Erhebungsinstrumente

Zentraler Ausgangspunkt für die Auswahl und Konzeption der Erhebungsinstrumente ist deren Kontextualisierung, wie zunächst begründet werden soll:
Zum einen motiviert das Erkenntnisinteresse im Bereich von *Nature-of-Science* (siehe FF 2.2 a) und b)) die Bindung der Datenerhebung an einen unterrichtsrelevanten Kontext. Ausgangspunkt hierfür ist die Kritik an Studien zur Untersuchung von *Nature-of-Science*-Vorstellungen mithilfe von Fragebogen. Allchin (2011, vgl. S. 528) stellt diesbezüglich fest, dass Fragebogenstudien meistens zu geschlossen sind, als das dadurch wohl begründete, tiefgründige Äußerungen der Befragten möglich sind. Deshalb fordert Allchin die Verknüpfung von Instrumenten mit konkreten Kontexten, die auch einen Bezug zu authentischen Erfahrungen bzw. Fällen herstellen (vgl. ebd., S. 529).

Eine ähnliche Kritik wird von Guerra-Ramos, Ryder und Leach (2010) vorgebracht. Die Autoren gelangen zu der Einschätzung, dass Instrumente, die auf den Vergleich der *Nature-of-Science*-Vorstellungen von Lehrkräften mit normativ verorteten, wissenschaftstheoretischen bzw. -philosophischen Aussagen abzielen, kaum der Vielfalt und Vielschichtigkeit des *Nature-of-Science*-Verständnisses der Lehrkräfte im Hinblick auf deren Wirkung in pädagogischen Kontexten gerecht werden würden (vgl. ebd., S. 283, 300). Vielversprechender als geschlossene Fragebogenformate sei demgegenüber der Einbezug von Situationen mit starkem Bezug zum Unterricht (vgl. ebd., S. 299).

Laut Guerra-Ramos (2012, vgl. S. 638) sei fragwürdig, inwiefern die *Nature-of-Science*-Vorstellungen von Lehrkräften als stabile und kontextunabhängige Konzepte betrachtet werden dürften. Deshalb sei der Einsatz kontextfreier Fragen oder Items, die nur sehr allgemeine bzw. abstrakte Aussagen zur *Nature-of-Science* abbilden, nicht geeignet. Weiterhin sei es schwierig, aus Forschungsergebnissen, die ohne Bezug zum Unterrichtskontext gewonnen wurden, Schlussfolgerungen für eben diese Kontexte aus fachdidaktischer Sicht abzuleiten (vgl. ebd., S. 632). Zudem könnte die Orientierung von Erhebungsinstrumenten an konkreten Kontexten Problemen bei der Dateninterpretation entgegenwirken, die aufgrund individueller Begriffsverständnisse auftreten. So können Vorstellungen zwischen einzelnen Befragten untereinander, aber auch zwischen Befragten und Forschenden auseinandergehen, wenn es beispielsweise darum geht, was unter einer „Theorie“ oder einem „Naturgesetz“ verstanden wird. Solche Begriffe können aber gerade durch die Einbettung in konkrete Kontexte klarer bestimmt werden, was einem gemeinsames Verständnis und der Vergleichbarkeit von Daten zuträglich ist (vgl. ebd., S. 640 f.).

Die Erhebung von *Nature-of-Science*-Vorstellungen in einem auch pädagogisch relevanten Kontext wird beispielsweise in einer Studie von Taylor und Dana (2003) umgesetzt. Schüssele, Stahl und Mikelskis-Seifert (2019) nutzen bereits eine wissenschaftliche Kontroverse zur Kontextualisierung verschiedener Items bei der Untersuchung von epistemischen Überzeugungen. Hervorzuheben ist aber vor allem die Arbeit von Nott und Wellington (1998a), die sogenannte „critical incidents“ verwenden, um die *Nature-of-Science*-Vorstellungen von Lehrkräften zu untersuchen (siehe Kapitel 2.3.3, ab S. 61). Die Forschenden nutzen dabei Textbeschreibungen von problematischen Unterrichtssituationen und fordern die befragten Lehrkräfte auf, darzustellen, wie sie in diesen Situationen wahrscheinlich reagieren würden, wie sie außerdem Han-

deln könnten und wie sie eigentlich mit der Situation umgehen sollten (vgl. Nott und Wellington 1998a, S. 297). Diese Kontextualisierung mithilfe von Unterrichtssituationen begründen Nott und Wellington (1998a, vgl. S. 297) mit der Verortung des Wissens von Lehrkräften zu *Nature of Science* in deren Fachwissen und fachdidaktischem Wissen. Tatsächlich schlussfolgern Nott und Wellington (1996, vgl. S. 813) anhand des Einsatzes der critical incidents, dass das Wissen der Lehrkräfte im Bereich *Nature of Science* im Zusammenhang mit deren unterrichtlichem Handeln steht. Oulton, Dillon und Grace (2004, vgl. S. 419) sind überzeugt, dass sich critical incidents auch hinsichtlich der Untersuchung des Umgangs mit Kontroversen eignen, um sich eigener Ein- und Vorstellungen bewusst werden zu können und diesen situationsbezogen Ausdruck zu verleihen. Die direkte Verknüpfung mit authentischen unterrichtspraktischen Situationen, wie sie Nott und Wellington vorschlagen, wird auch von Leuders et al. (2019) als erfolgsversprechend eingestuft, „um die dem didaktischen Handeln von Lehrkräften zugrundeliegenden kognitiven Strukturen und Prozesse zu erfragen“ (ebd., S. 27).

Die obigen Erwägungen zur Kontextualisierung im Zusammenhang mit den Forschungsfragen FF 2.2 a) und b) lassen sich im Wesentlichen auch auf die Anforderungen an Instrumente übertragen, die Aufschluss zu den Forschungsfragen FF 1.1 und FF 1.2 sowie FF 2.1 a) und b) geben sollen:

- Die Erhebungsinstrumente sollten aufgrund der genannten Probleme mit geschlossenen Items hinreichend offen sein, auch im Sinne eines explorativen Zugangs.
- Ein direkter Bezug zum Unterrichtskontext ist notwendig, um aus den Ergebnissen der Erhebung auch Schlussfolgerungen zur Unterrichtspraxis ableiten zu können.
- Die Kontextualisierung hat Vorteile für die Interpretation der erhobenen Daten, auch im Sinne der Vergleichbarkeit.

Vor allem zur Untersuchung der Forschungsfragen 2.1 a) und b) ist die möglichst direkte Verknüpfung des Erhebungsinstrumentes mit authentischen Unterrichtssituationen aufgrund des damit verbundenen Erkenntnisinteresses unabdingbar.

Im Folgenden soll ausgehend von der Begründung der prinzipiellen Kontextualisierung der Erhebungsinstrumente deren konkrete Auswahl erläutert werden.

Gedankenlisten

Um entsprechend der Forschungsfragen FF 1.1 und FF 1.2 zu untersuchen, wie Lehrkräfte bzw. Lehramtsstudierende mit wissenschaftlichen Kontroversen umgehen und welche Bewertungskriterien sie nutzen, wurden die Befragten im ersten Teil der Erhebung mit verschiedenen Textmaterialien (Auswahl und Reihenfolge siehe Kapitel 6.2, ab S. 170) zur Kontroverse um die Relativität der Masse in der Speziellen Relativitätstheorie konfrontiert. Die Auseinandersetzung der Studienteilnehmenden mit diesen Materialien entspricht den Prozessen in der präselektionalen Entscheidungsphase (siehe Abbildung 5.2, S. 152). Die dargebotenen Textmaterialien realisieren hierbei die Kontextualisierung der Erhebung einerseits durch den Bezug zu einem konkreten unterrichtsrelevanten physikalischem Thema (Relativität der Masse) und andererseits durch die Auswahl authentischer Textinhalte (Lehrbuchtexte, Unterrichtsmaterial für Lehrkräfte, Lehrplan, Auszüge aus wissenschaftlichen Artikeln).

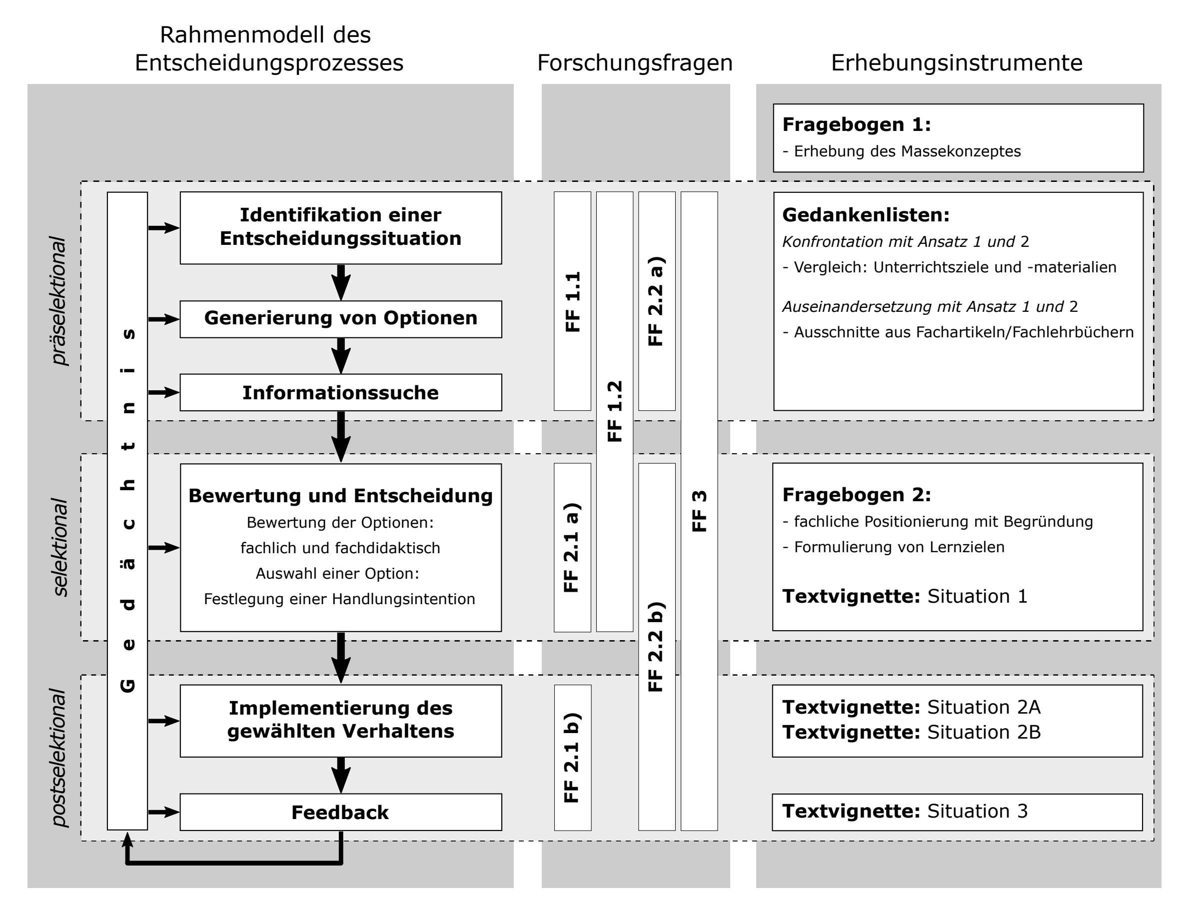


Abbildung 5.2: Verortung der Erhebungsinstrumente im Rahmenmodell des Entscheidungsprozesses nach Betsch, Funke und Plessner (2011, vgl. S. 75)

Zusätzlich zum Lesen des Textmaterials wurden die Teilnehmenden der Studie aufgefordert, sogenannte Gedankenlisten zu erstellen, bei denen sie die jeweils wichtigsten Gedanken zu den einzelnen Textmaterialien verschriftlichen sollten (siehe Anhang A2, S. 265). Diese Erhebungsmethode wurde in Anlehnung an das Verfahren der „Gedankenauflistung“ (vgl. Hoyer und Chaker 2009, S. 398 f.), das im Bereich der Verhaltenstherapie diagnostischen Zwecken dient, konzipiert. Bei dieser Methode werden die Befragten gebeten, ihre Gedanken zu einem Thema zu notieren. Diese aufgeschriebenen Gedanken und ihre jeweilige Reihenfolge ermöglichen einen Einblick in die Ansichten, das Denken und Fühlen ihrer Urheber (vgl. ebd., S. 398). Das offene, ungerichtete Erhebungsformat der Gedankenauflistung gibt den Befragten Gelegenheit, authentisch auf den Stimulus der zu lesenden Textmaterialien zu reagieren und lässt eine Inaugenscheinnahme der „nicht sichtbar ablaufenden »inneren Handlungen«, die eine Person vollzieht“ (ebd.), zu. Da die Erstellung von Gedankenlisten zeitlich möglichst unmittelbar mit den tatsächlich ablaufenden Kognitionen zusammenfallen sollte (vgl. ebd., S. 399), erstellten die Teilnehmenden der Studie direkt im Anschluss an das Lesen jedes einzelnen Textmaterials eine Gedankenliste.

Die Explizierung der eigenen Gedanken ist auch Grundgedanke der Methode des lauten Denkens, mit deren Hilfe ebenfalls ein Einblick in laufende Kognitionsprozesse gewonnen werden soll (vgl. Sandmann 2014, S. 179). Insofern gibt es deutliche Parallelen zur Methode der Gedankenauflistung. Im Unterschied zum lauten Denken erfolgt die Äußerung der Gedanken in Form von Gedankenlisten wahrscheinlich mit einem größeren Zeitversatz aufgrund der Verschriftlichung. Dies hat für die konkrete Studie allerdings zwei entscheidende Vorteile: Zum einen erfordert das Lesen der zum Teil fachlich komplexen Argumentationen in den Textmaterialien ein hohes Maß an Konzentration, so dass davon auszugehen ist, dass die Befragten mit dem simultanen lauten Denken überfordert wären. Das parallele Lesen der Materialien und verbale Äußern der eigenen Gedanken wäre mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. Zum anderen erhalten die Studienteilnehmenden mit den Gedankenlisten die Möglichkeit, die aufgenommenen Informationen zunächst entsprechend verarbeiten zu können, bevor sie die eigenen Gedanken artikulieren. Das schriftliche Erhebungsverfahren begünstigt damit auch die Sammlung der *wichtigsten* Gedanken, da es Raum für eine vorherige kurze Selbstreflexion bietet. Die Entwicklung und Erprobung der Gedankenlisten als Erhebungsinstrument wird in Kapitel 6.2 (ab S. 170) beschrieben.

Textvignetten

Um entsprechend der Forschungsfragen FF 2.1 a) und b) zu untersuchen, welche Handlungsintentionen und -möglichkeiten Physiklehrkräfte bzw. Physiklehramtsstudierende bei der Konfrontation mit einer wissenschaftlichen Kontroverse im Unterrichtskontext äußern, wurden im zweiten Teil der Erhebung vier Textvignetten mit Bezug zur Thematik der Relativität der Masse im Physikunterricht eingesetzt (siehe Anhang A4, S. 278). Zusätzlich dienen die Textvignetten der Erforschung von *Nature-of-Science*-Aspekten, die von Lehrkräften und Lehramtsstudierenden im Zusammenhang mit der wissenschaftlichen Kontroverse im Unterrichtskontext thematisiert werden (Forschungsfrage FF 2.2 b)). Die Textvignetten wurden für die Erfassung der Prozesse in der postselektionalen Phase des Entscheidungsprozesses konzipiert und ermöglichen die Untersuchung der Implementierung konkreten Lehrendenhandelns in einer fiktiven Situation im Schul- bzw. Unterrichtskontext sowie der Reaktion der Befragten auf ein entsprechendes Feedback (siehe Abbildung 5.2, S. 152). Insofern werden mithilfe der Textvignetten keine realen Unterrichtshandlungen der Befragten abgebildet, sondern lediglich wahrscheinliche Möglichkeiten zu Handeln, die von den Befragten für ihre eigene Unterrichtspraxis erwogen werden.

Wie zu Beginn dieses Kapitels erläutert, ist die Kontextualisierung der Erhebungsinstrumente von wesentlicher Bedeutung. Guerra-Ramos (2012, vgl. S. 643 f.) betont, dass der dabei gewählte Kontext nicht nur eine rein inhaltliche Rahmung bieten sollte, sondern daneben auch die Einbettung in professionstypische Situationen, die Lehrkräfte in ihrem beruflichen Alltag erleben könnten, zulassen soll. Zur Umsetzung dessen orientiert sich dieser Teil der Datenerhebung am Einsatz fiktiver, aber authentischer Situationen bzw. Fälle, wie sie Nott und Wellington (1998a) mit ihren „critical incidents“ vorschlagen. Diese zeigen erhebliche Ähnlichkeiten mit der Vignettenmethode, bei der sich die Befragten mit zum Teil komplexen, konkreten Situationen auseinandersetzen.

Vignetten sind Situations- bzw. Fallbeschreibungen, die als Ausgangspunkt einer Befragung dienen (vgl. Schnurr 2003, S. 393). Schnurr (2003, S. 396) versteht Vignetten „insbesondere als Instrument zur Erschließung der hinter den Entscheidungen stehenden Prämissen und Rationalitätsmuster“ und legt deren Nützlichkeit bei der Ergründung bevorzugter Handlungsoptionen und Beurteilungskriterien dar. Werden Vignetten in Verbindung mit der Aufforderung zum Begründen eingesetzt, würden „in weit stärkerem Maß als sonst die meist implizit gehaltenen Relevanzmuster, Wahrnehmungsperspektiven und Beurteilungskriterien expliziert werden“ (ebd., S. 397). Vignetten, die unterrichtsbezogene Situationen bzw. Fälle abbilden, können insofern als geeignete Stimuli angesehen werden, um die kontextpezifischen Handlungsmöglichkeiten von Befragten zu untersuchen (vgl. Streit und Weber 2013, S. 987; Upmeier zu Belzen und Merkel 2014, S. 203).

Vorteile der Vignettenmethode liegen vor allem im Einbezug authentischer, komplexer Situationen als Erhebungskontext. Dies begünstigt die direkte Nähe zur professionellen Unterrichtspraxis von Lehrkräften, weshalb Vignetten beispielsweise bereits erfolgreich zur Erfassung des fachdidaktischen Wissens von Lehrkräften herangezogen wurden (vgl. Rehm und Bölsterli 2014, S. 213 ff.; Tepner und Dollny 2014, S. 312). Dabei wird die ökologische Validität (Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die tatsächliche Lebenswirklichkeit) von Vignetten vornehmlich durch eine hinreichende Komplexität und Authentizität der dargestellten Situationen bestimmt (vgl. Brovelli et al. 2013, S. 310). Die Übertragbarkeit der Ergebnisse von Vignettenstudien auf die Unterrichtswirklichkeit in Schulen hängt damit sensitiv von der Erfüllung dieser beiden Kriterien ab und erfordert eine dementsprechende Konzeption der Vignetten, wie in Kapitel 6.3 (ab S. 174) genauer beschrieben wird. Brovelli et al. (2013, vgl. S. 310) legen in diesem Zusammenhang dar, dass verschiedene empirische Studien auf teilweise gute Übereinstimmung der mittels Vignetten gewonnenen Ergebnisse mit realen Unterrichtshandlungen hinweisen, was für die Prognosekraft von Vignettendaten spricht.

Die Bearbeitung der Textvignetten erfolgt schriftlich durch die Teilnehmenden der Studie, um ihnen Gelegenheit zum Nachdenken und zur aktiven Auseinandersetzung mit der wissenschaftlichen Kontroverse zu geben. Dieses Vorgehen soll Probleme minimieren, wie sie von Priemer (2006) in Verbindung mit der Erhebung epistemologischer Überzeugungen beschrieben werden, da diesbezüglich Schnittmengen zur Forschung im Bereich von *Nature of Science* bestehen. Priemer gibt an, dass gegebene Antworten inkonsistent sein können, weil nicht von einer tiefgreifenden Reflexion epistemologischer Fragestellungen ausgegangen werden kann und sieht vor allem bei der Durchführung von Interviews einen Nachteil im Druck, prompt zu antworten. Dieser könne dazu führen, dass die Befragten zu leicht abweichenden, anderen Konzepten übergehen, die gleichsam keine „adäquaten“ Vorstellungen repräsentieren (vgl. ebd, S. 167). Ein allgemeines Problem bei der Untersuchung epistemologischer Überzeugungen sieht Priemer zusätzlich in den Interpretationsmöglichkeiten der erhobenen Daten: „Hier besteht die Gefahr einer fälschlichen Auslegung der Antworten von Probanden durch den Testleiter sowohl bei standardisierten Items als auch bei offenen Fragen“ (ebd.). Auch vor diesem Hintergrund ist die Reaktion der Befragten in schriftlicher Form günstig. Interpretationsfehler von Äußerungen aufgrund unklarer oder wenig eindeutiger sprachlicher Darstellungen sollen ebenso reduziert werden wie der Einfluss des datenerhebenden Forschers (z. B. Interviewereffekte). Ein zusätzliches Argument für eine schriftliche Datenerhebung liefern Sadler, Chambers

und Zeidler (2004) aus der Erfahrung der empirischen Forschung heraus. Die Autoren analysierten in einer Studie die *Nature-of-Science*-Konzepte ihrer Befragten sowohl mithilfe der schriftlichen Antworten eines Fragebogens als auch auf Basis von Interviews und gelangen im Vergleich der beiden Zugänge zu dem Ergebnis:

> Contrary to our expectations, student responses were more expressive and revealed more complete lines of rationale in the written responses than in the interview transcriptions. The combined influences of an unfamiliar interviewer, a novel setting (a teacher preparation area), and the perceived pressure of a tape recorder may have accounted for the relatively limited remarks offered in the interviews. (ebd., S. 392 f.)

Dementsprechend wurde für das Instrument eine schriftliche Datenerhebung vorgesehen.

Fragebogen

Im Rahmen der Datenerhebung wurden insgesamt zwei verschiedene Fragebogen eingesetzt:

- Fragebogen 1 zur Erfassung des Massekonzeptes der Befragten (siehe Anhang A1, S. 263)
- Fragebogen 2 zur Erfassung der konkreten fachlichen Positionierung der Befragten als Entscheidung in der selektionalen Phase sowie der damit verbundenen Formulierung von Handlungsintentionen im Unterrichtskontext (siehe Anhang A3, S. 277)

Um zu untersuchen, wie Physiklehrkräfte und Physiklehramtsstudierende mit einer wissenschaftlichen Kontroverse als Entscheidungssituation hinsichtlich der Darstellung im Unterricht umgehen (Forschungsfrage FF 1.1), wird die Kontroverse zur Relativität der Masse als Untersuchungskontext genutzt. Dabei ist wichtig, im Vorfeld der Auseinandersetzung mit der Kontroverse das Vorwissen der Lehrkräfte und Studierenden zu berücksichtigen, da dies den individuellen Umgang mit der Kontroverse mitbestimmen wird. Zu diesem Zweck wurde Fragebogen 1 mit geschlossenen Items konzipiert, um die jeweiligen Massekonzepte (Ansatz 1 oder Ansatz 2) der befragten Physiklehrkräfte und Physiklehramtsstudierenden vor der Auseinandersetzung mit der wissenschaftlichen Kontroverse zur Relativität der Masse (siehe Abbildung 5.2, S. 152) identifizieren zu können. Informationen zur Entwicklung und Erprobung des Fragebogens werden in Kapitel 6.1 (S. 167) angegeben.

Mithilfe des Fragebogens 2 wird die in der selektionalen Phase (siehe Abbildung 5.2, S. 152) stattfindende eigentliche Entscheidung über die Darstellung des kontroversen Fachinhaltes im Unterricht untersucht. Ein Teilaspekt dieser Entscheidung ist mit einem fachlichen Urteil verknüpft. Deshalb wurden die Studienteilnehmenden in den ersten beiden Fragen zu ihrer Fachposition im Hinblick auf die Relativität der Masse befragt. Damit die den Lehrkräften und Lehramtsstudierenden wichtigen Bewertungskriterien im Zuge dieser Entscheidung erfasst werden können (Forschungsfrage FF 1.2), wurden die Teilnehmenden gebeten, ihre Position zu begründen. Der zweite Teilaspekt der Entscheidung ist fachdidaktischer Natur, da die Befragten entscheiden müssen, wie die Thematik der Relativität der Masse im Physikunterricht dargestellt werden soll. Die aus dieser Entscheidung resultierenden Handlungsintentionen (Forschungsfrage FF 2.1 a)) wurden in Form von Lernzielen für den Physikunterricht

festgehalten. Die Begründung der Fachposition sowie die Nennung von Lernzielen entsprechen einem offenen Erhebungsformat, in dem die Befragten ohne konkrete inhaltliche Lenkung eigene Gedanken entwickeln (vgl. Bierhoff und Petermann 2014, S. 175), so dass individuelle Argumente und Überlegungen aufgenommen werden können (vgl. Hammann und Jördens 2014, S. 169).

5.3 Durchführung der Datenerhebung

Nach einer Pilotierung der Erhebungsinstrumente im September 2018 wurde die Hauptstudie im Zeitraum von Februar bis April 2019 durchgeführt. Die Akquise der Physiklehrkräfte erfolgte im Zusammenhang mit einer Lehrkräftefortbildung zur Speziellen Relativitätstheorie, die auch im sächsischen Fortbildungskatalog für Lehrkräfte angeboten wurde. Insgesamt wurde die Fortbildung zu sechs verschiedenen Zeitpunkten mit jeweils kleinen Teilnehmendenzahlen an den folgenden Orten ausgerichtet (siehe Tabelle 5.1):

Dresden: an der TU Dresden, Professur für Didaktik der Physik

Leipzig: am Zentrum für Lehrerbildung und Schulforschung (ZLS)

Meißen: am Fortbildungs- und Tagungszentrum des Landesamtes für Schule und Bildung (Sächsischen Bildungsinstitut)

Die Physiklehramtsstudierenden wurden im Rahmen einer Blockseminar-Veranstaltung der Physikdidaktik zur Speziellen Relativitätstheorie im Sommersemester 2019 an der TU Dresden befragt (zwei verschiedene Seminar-Termine).

Tabelle 5.1: Erhebungszeitpunkte mit Ort und Teilnehmendenzahl

	Lehrkräfte						Studierende	
Ort	Dresden			Leipzig		Meißen	Dresden	
Zeitpunkt in 2019	Februar	März	März	Februar	März	April	April	April
Teilnehmendenzahl	6	7	8	7	9	6	11	11

Die Datenerhebung wurde jeweils in den Ablauf der Fortbildungs- bzw. Seminarveranstaltungen integriert (siehe Abbildung 5.3, S. 158). Um die Vergleichbarkeit der Rahmenbedingungen bei der Datenerhebung mit den Lehrkräften und Studierenden zu gewährleisten, wurde das Seminar für die Studierenden als Blockveranstaltung durchgeführt, so dass alle Seminarinhalte vor der Datenerhebungsphase und die Datenerhebung selbst identisch mit denen der Lehrkräftefortbildung sind. Seminar- bzw. Fortbildungsinhalte, die dabei vor der Datenaufnahme behandelt wurden, sind thematisch vollständig separiert zur Datenerhebung konzipiert wurden. Das heißt, im ersten Teil der Fortbildungs- oder Seminarveranstaltung wurden Inhalte aus dem Bereich der Kinematik der Speziellen Relativitätstheorie vermittelt. Dies ermöglichte eine Wiederholung wichtiger Begriffe und die Reaktivierung grundlegenden Wissens zum physikalischen Thema, ohne Bezug auf den Inhaltsbereich der Dynamik der Speziellen Relativitätstheorie zu nehmen, der für die Datenerhebung bedeutsam ist. Direkt vor Beginn der Datenerhebung wurden die Teilnehmenden vom Studienleiter (derselbe bei allen Erhebungen) über wichtige Aspekte des Datenschutzes, die zur Verfügung stehende Bearbeitungszeit sowie den Ablauf der Studie aufgeklärt. Unter dem zuletzt genannten Punkt wurden die Studienteilnehmenden instruiert, die Erhebungsinstrumente in der vorgegebenen Reihenfolge selbstständig und ohne fremde Hilfe (kein Eingreifen des Studienleiters) zu bearbeiten. Um eine Beeinflussung der Befragten zu vermeiden, wurden die konkreten Ziele und Fragestellun-

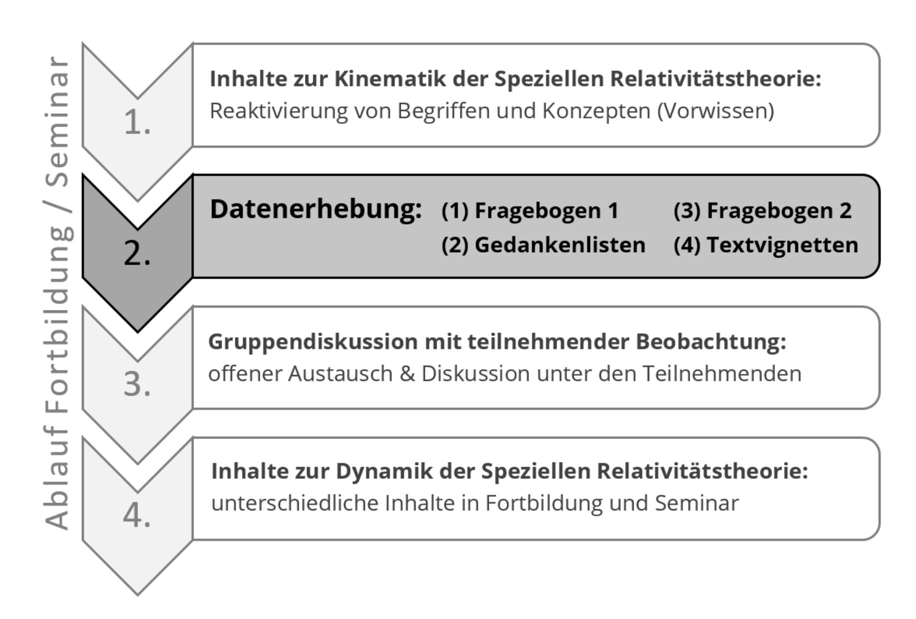


Abbildung 5.3: Integration der Datenerhebung innerhalb der Fortbildung/des Seminars

gen des Forschungsvorhabens nicht im Vorfeld erläutert. Das Lesen aller Textmaterialien und die Bearbeitung der Instrumente durch die Befragten gemäß der in Abbildung 5.2 (S. 152) dargestellten Reihenfolge beanspruchte etwa 90 Minuten. Teilnehmende, die weniger als die veranschlagte Zeit benötigten, konnten eigenständig pausieren, ohne den Studienablauf zu stören.

Zu Beginn der Datenerhebungsphase wurden mithilfe des Fragebogens 1 (siehe Anhang A1, S. 263) die folgenden soziodemografischen und allgemeinen Daten der teilnehmenden Lehrkräfte erfasst:

- Geschlecht
- Alter
- Dienstjahre
- Schulart
- Unterrichtsfächer, für die eine Lehrbefähigung vorliegt
- Unterrichtsfächer, die zurzeit unterrichtet werden
- Lehrerfahrung im Physikunterricht der Sekundarstufe II
- Unterrichtserfahrung mit dem Thema *Spezielle Relativitätstheorie*

Für die befragten Lehramtsstudierenden wurde Fragebogen 1 angepasst, um die folgenden soziodemografischen und allgemeinen Daten zu erhalten:

- Geschlecht
- Alter
- Fachsemester
- studierte Schulart
- Zweit- bzw. gegebenenfalls Drittfach
- Unterrichtserfahrung mit dem Thema *Spezielle Relativitätstheorie*

Nach der Datenerhebung wurde den Teilnehmenden die Möglichkeit zum gemeinsamen Austausch und zur Diskussion bezüglich der gelesenen Materialien gegeben (siehe Abbildung 5.2 S. 152). Die Beiträge wurden dabei vom Studienleiter im Rahmen einer teilnehmenden Beobachtung stichpunktartig notiert und unmittelbar im Anschluss an die Fortbildung bzw. das Seminar als Gedächtnisprotokoll ergänzt. Die dabei gewonnenen Daten wurden den schriftlichen Datensätzen der jeweiligen Befragten beigelegt und dienten zu deren Abgleich. Sie konnten während des Auswertungsprozesses für die Interpretation der Daten zusätzlich herangezogen werden.

5.4 Auswertungsmethoden

Fragebogen 1

Fragebogen 1 wurde entsprechend des in Anhang E.1 (S. 383) beschriebenen Vorgehens ausgewertet, um ermitteln zu können, inwiefern die Befragten zu Ansatz 1 (mit relativistischer Masse) oder Ansatz 2 (geschwindigkeitsunabhängige Masse) tendieren (konkrete Auswertungsmethode siehe Kapitel 8.1, ab S. 183). Die Ergebnisse der Fragebogenauswertung wurden anschließend mit den Aussagen in den Gedankenlisten der Studienteilnehmenden trianguliert, da die Beantwortung des Fragebogens nicht in jedem Fall eine eindeutige Zuordnung zu einem der beiden Massekonzepte zuließ. Der Abgleich der Fragebogendaten mit denen der Gedankenlisten bei der Feststellung der vorhandenen Massekonzepte ermöglichte eine zuverlässigere Einschätzung des Vorwissens der Befragten zur Masse in der Speziellen Relativitätstheorie.

Gedankenlisten, Fragebogen 2 und Textvignetten

Hauptsächlich erfolgte die Auswertung der Gedankenlisten der Teilnehmenden der Studie sowie deren schriftlichen Antworten zu den Textvignetten und im Fragebogen 2 mit qualitativen Methoden, um die in Kapitel 4 (ab S. 141) formulierten Forschungsfragen beantworten zu können. Qualitative Methoden erscheinen dabei besonders geeignet, um einen hinreichend offenen Zugang zum Datenmaterial zu ermöglichen, der dem Charakter der explorativen Studie gerecht wird. Die Daten der Gedankenlisten, der schriftlichen Antworten bei den Textvignetten und im Fragebogen 2 wurden transkribiert, computergestützt mit der Software MAXQDA erfasst und mithilfe der inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2016) ausgewertet. Dabei wurden ausgehend von den Forschungsfragen (siehe Tabelle A.1, S. 286) die folgenden Kategoriensysteme erstellt:

Kategoriensystem *G*: Gedanken bei der Konfrontation mit einer wissenschaftlichen Kontroverse

Kategoriensystem *B*: Bewertungskriterien

Kategoriensystem *I*: Handlungsintentionen

Kategoriensystem *H*: Handlungsmöglichkeiten

Kategoriensystem *NG*: *Nature-of-Science*-Vorstellungen (Gedankenlisten)

Kategoriensystem *NV*: *Nature-of-Science*-Aspekte im Unterrichtskontext (Vignetten)

Während die Kategoriensysteme *G* und *B* in einem vollständig induktiven Prozess ausgearbeitet wurden, erfolgte die Entwicklung der Kategoriensysteme *I*, *H*, *NG* und *NV* deduktiv-induktiv (vgl. Kuckartz 2016, S. 95), das heißt, sie basieren auf bestehenden Systematisierungen und wurden ausgehend davon anhand des Datenmaterials konstruiert (vgl. ebd., S. 64). Als theoretischer Ausgangspunkt der empirischen Gewinnung der Kategoriensysteme *I* und *H* dienten die sechs Gesichtspunkte für den Umgang mit wissenschaftlichen Kontroversen im Unterricht, wie sie in Kapitel 2.4.1 (ab S. 71) zusammengestellt wurden:

(1) Kontroversitätsprinzip und Multiperspektivität

(2) Diskutieren und Argumentieren

(3) Informationsklarheit gewinnen

(4) kritische Haltung

(5) Bewertungsstrukturwissen

(6) *Nature of Science* thematisieren

Bei der Erstellung der Kategoriensysteme *NG* und *NV* flossen die theoretischen Vorüberlegungen zu den *Nature-of-Science*-Aspekten im Zusammenhang mit wissenschaftlichen Kontroversen ein, wie sie in Kapitel 2.3.1 (ab S. 45) diskutiert wurden.

Tabelle 5.2: Übersicht zu den gebildeten Kategoriensystemen

Forschungsfrage	Kategoriensystem	Codierleitfaden
FF 1.1	Kategoriensystem *G*	Anhang B1 (S. 297)
FF 1.2	Kategoriensystem *B*	Anhang B2 (S. 315)
FF 2.1 a)	Kategoriensystem *I*	Anhang B3 (S. 321)
FF 2.1 b)	Kategoriensystem *H*	Anhang B4 (S. 335)
FF 2.2 a)	Kategoriensystem *NG*	Anhang B5 (S. 350)
FF 2.2 b)	Kategoriensystem *NV*	Anhang B6 (S. 356)

Die Entwicklung und Erprobung der Kategoriensysteme erfolgte jeweils in drei Phasen (siehe Abbildung 5.4, S. 163). In der ersten Phase wurden unter Einbezug von etwa 40% des Datenmaterials Kategorien mithilfe der folgenden Schrittfolge für die inhaltlich strukturierenden Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2016, vgl. S. 100) gebildet:

1. *initiierende Textarbeit* (ebd., S. 101):
   Auf Basis einer ersten Lektüre des kompletten vorliegenden Datenmaterials wurden im Hinblick auf die Forschungsfragen Fallzusammenfassungen für alle Datensätze der Studienteilnehmenden erstellt. Auf Grundlage dieser Fallzusammenfassungen wurde ein Teil der Datensätze (etwa 40%) ausgewählt (siehe Anhang D, Tabelle D.1, S. 379 und Tabelle D.2, S. 381), um in der Entwicklungsphase der Kategoriensysteme die Schritte 2 bis 6 der inhaltlich strukturierenden Inhaltsanalyse durchzuführen. Die Auswahl dieser Fälle orientierte sich dabei an einer breiten Abdeckung möglichst unterschiedlicher Fälle (unterschiedlich sowohl in Bezug auf den Inhalt der Datensätze als auch die soziodemografischen und allgemeinen Daten der Befragten) sowie dem Einbezug möglichst reichhaltiger, vollständiger Datensätze. Diese Beschränkung des Umfangs des analysierten Materials ermöglichte einerseits die Kategorienbildung mithilfe der Schritte 2 bis 6 für eine überschaubare Datenmenge. Andererseits konnte somit in einer zweiten Phase (siehe Abbildung 5.4, S. 163) überprüft werden, inwiefern ein Sättigungseffekt der Ka-

tegorienbildung erreicht werden konnte, indem die Codierung auf die restlichen rund 60% des Datenmaterials ausgeweitet wurde (vgl. ebd., S. 85, 102).

2. *Entwickeln von thematischen Hauptkategorien* (ebd., S. 101):
   Entsprechend der Forschungsfragen wurden als Hauptkategorien für die Datenanalyse die Themen

   - Gedanken bei der Konfrontation mit einer wissenschaftlichen Kontroverse (FF 1.1)
   - Bewertungskriterien (FF 1.2)
   - Handlungsintentionen (FF 2.1 a))
   - Handlungsmöglichkeiten (FF 2.2 b))
   - *Nature-of-Science*-Vorstellungen (FF 2.2 a))
   - *Nature-of-Science*-Aspekte im Unterrichtskontext (FF 2.2 b))

   festgelegt. Aufgrund der erwarteten Komplexität durch die spätere Bildung von Unterkategorien (siehe Schritt 5) wurde zu jeder dieser Hauptkategorien ein eigenständiges Kategoriensystem (siehe Tabelle A.1, S. 286) erarbeitet.

3. *Codieren des Materials mit den Hauptkategorien* (vgl. ebd., S. 102):
   Der ausgewählte Teil der Datensätze wurde zunächst mit den Themen der Hauptkategorien codiert. Dabei wurden Textsegmente aus den folgenden Abschnitten der einzelnen Datensätze mit den jeweiligen Hauptkategorien codiert (siehe auch Abbildung 5.2, S. 152, Zuordnung der Instrumente zu den Forschungsfragen und damit den Hauptkategorien):

   - Gedanken bei der Konfrontation mit einer wissenschaftlichen Kontroverse:
     Codiert wurden die Gedankenlisten.
   - Bewertungskriterien:
     Codiert wurden die Gedankenlisten, die Antworten im Fragebogen 2 zu 1. und 2. (fachliche Entscheidung mit Begründung) sowie die Aussagen in Bezug auf Vignette 1.
   - Handlungsintentionen:
     Codiert wurden die Antworten im Fragebogen 2 zu 3. (Lernziele) sowie die Aussagen in Bezug auf Vignette 1.
   - Handlungsmöglichkeiten:
     Codiert wurden die Aussagen in Bezug auf die Vignetten 2A, 2B und 3.
   - *Nature-of-Science*-Vorstellungen:
     Codiert wurden die Gedankenlisten.
   - *Nature-of-Science*-Aspekte im Unterrichtskontext:
     Codiert wurden die Aussagen in Bezug auf die Vignetten 1, 2A, 2B und 3.

4. *Zusammenstellen aller Codings einer Hauptkategorie* (vgl. ebd., S. 106):
   Es erfolgte für jede Hauptkategorie eine Zusammenstellung aller Textsegmente, die mit

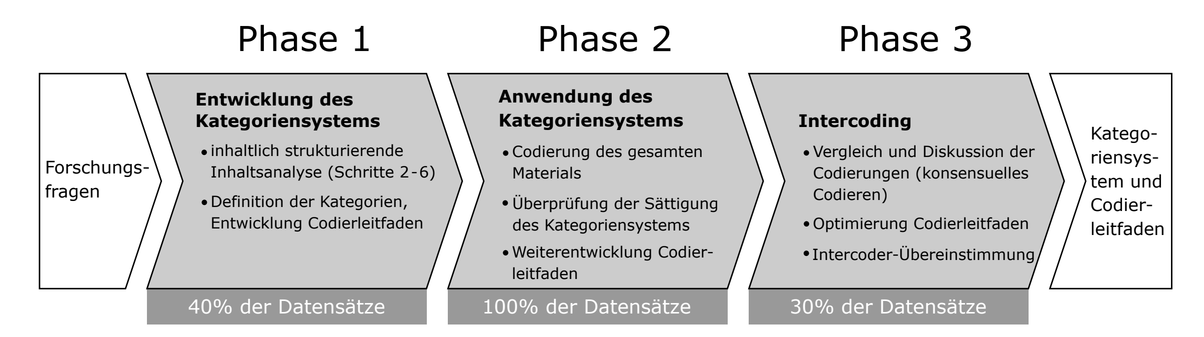


Abbildung 5.4: Entwicklung und Erprobung der Kategoriensysteme und Codierleitfäden

dieser Hauptkategorie codiert wurden. Die so entstandene Liste aller Codings für jede Hauptkategorie wurde anschließend genutzt, um Schritt 5 durchführen zu können.

5. *induktives Bestimmen von (Unter-)Kategorien am Material* (vgl. ebd., S. 106):
   In diesem Schritt werden die eigentlichen Kategorien der einzelnen Kategoriensysteme gebildet. (Dies entspricht somit der Bildung von Unterkategorien zu den Hauptkategorien.) Anhand der Liste aller Codings einer Hauptkategorie (Schritt 5) wurden möglichst offen induktiv bzw. deduktiv-induktiv erste Kategorien zur Differenzierung der Hauptkategorien entwickelt. Die hierbei generierten Kategorien wurden in einem iterativen Prozess weiterentwickelt und neustrukturiert (vgl. ebd., S. 86), indem inhaltsgleiche Kategorien zusammengefasst oder in einer gemeinsamen Oberkategorie geordnet und andererseits inhaltsverschiedene Codings einer Kategorie in unterschiedlichen Unterkategorien neu systematisiert wurden (vgl. ebd., S. 84 f., 106). Wenn keine neuen Kategorien mehr gebildet werden, weil sich alle Textsegmente eindeutig den bestehenden Kategorien zuordnen lassen, ist eine „Sättigung“ (ebd., S. 85) des Kategoriensystems erreicht und der Systematisierungs- und Neucodierungsprozess vorläufig abgeschlossen. Als Ergebnis dieses Prozesses konnten die gewonnenen Kategorien definiert und mit konkreten Codings als Ankerbeispielen illustriert werden. Entsprechend des Schemas zur Kategoriendefinition nach Kuckartz (2016, vgl. S. 40) konnten so erste Codierleitfäden zu den Kategoriensystemen ausgearbeitet werden.

6. *Codieren des Materials mithilfe der Kategoriensysteme* (vgl. ebd., S. 110):
   Mithilfe der entwickelten Codierleitfäden wurde das ausgewählte Material erneut analysiert. Beim Codieren auftretende Fragen zur Anwendung von Kategorien, Probleme der Trennschärfe, logische Widersprüche oder inhaltliche Überschneidungen eigentlich disjunkter Kategorien führten zu teilweisen Anpassungen von Kategoriendefinitionen und Präzisierungen der Codierleitfäden.

Im Anschluss an die Entwicklung der Kategoriensysteme und Ausarbeitung der zugehörigen Codierleifäden wurde in einer zweiten Phase (siehe Abbildung 5.4) das gesamte verbliebene Material codiert, um die Sättigung der Kategoriensysteme überprüfen zu können. Da in dieser Phase keine neuen Kategorien definiert werden mussten, um alle Daten vollständig codieren zu können, ist davon auszugehen, dass die Sättigung der Kategoriensysteme bereits nach der

Durchsicht von maximal etwa 40% des Datenmaterials erreicht werden konnte. Dieser Befund ist ein Indikator für die inhaltliche Repräsentativität der Kategoriensysteme in Bezug auf die gestellten Forschungsfragen. Die Anwendung der Codierleitfäden auf das komplette Datenmaterial bedingte nur geringfügige Anpassungen zur Optimierung der Leitfäden. Da das Kategoriensystem *G* rein induktiv gebildet wurde und die Codierungen inhaltlich vergleichsweise komplex sind, wurden besonders „kritische" Codings ausgewählt, um sie gemeinsam mit Fachdidaktikern ($N = 6$) nach zunächst eigenständiger Codierung zu diskutieren. Anschließend wurden die besprochenen Textstellen auf Grundlage eines Konsens unter den Fachdidaktikern codiert.

Intercoder

Die Güte der Codierleitfäden und der damit verbundenen Kategoriendefinitionen, aber vor allem auch die Codierungen selbst, wurden in einer dritten Phase (siehe Abbildung 5.4, S. 163) durch Hinzuziehen eines Intercoders geprüft. Für das Intercoding wurden aus allen vollständigen Datensätzen (der Datensatz eines Befragten ist vollständig, wenn die Gedankenlisten, alle Antworten zum Fragebogen 2 und allen Textvignetten vorliegen; vollständig sind etwa 66% aller Datensätze) zufällig Datensätze ausgewählt (siehe AnhangD, Tabelle D.1, S. 379 und Tabelle D.2, S. 381). Dieses für das Intercoding genutzte Datenmaterial entspricht rund 30% der gesamten vorhandenen Daten. Nachdem im Vorfeld des Codierungsprozesses des Intercoders intensiv die Codierleitfäden besprochen wurden, um mögliche Unklarheiten bei der Anwendung zu vermeiden, wurden alle ausgewählten Datensätze unabhängig von den bereits vorliegenden Codierungen codiert. Im Zuge des Intercodings konnte die Anwendbarkeit und Genauigkeit der Codierleitfäden getestet werden, was die Qualität der Leitfäden weiter erhöhen konnte (vgl. Rädiker und Kuckartz 2019, S. 288). In Anlehnung an das konsensuelle Codieren (vgl. ebd., S. 289; Kuckartz 2016, S. 211 f.) wurden die bereits vorhandenen Codierungen mit denen des Intercoders abgeglichen, um Abweichungen identifizieren und diskutieren zu können. Daraus resultierten einige wenige Anpassungen in den Details der Codierleitfäden, die sich insgesamt bewähren konnten.

Zusätzlich konnte die Intercoder-Übereinstimmung zur Messung der Qualität der Codierungen bestimmt werden. Hierfür wurden in MAXQDA einerseits die Übereinstimmungswerte für das Vorhandensein der Kategorien sowie für eine segmentweise Übereinstimmung berechnet. Die konkreten Übereinstimmungswerte finden sich im Anhang C (ab S. 361). Da die prozentuale Codeüberlappung der codierten Segmente sich sensitiv auf den Wert der Intercoder-Übereinstimmung auf Segment-Ebene auswirkt, die Codiereinheiten aber nicht vorab festgelegt wurden, so dass eine starke Überlappung der codierten Segmente unwahrscheinlich ist, wurden die Übereinstimmungswerte jeweils für eine 75%-Überlappung und eine 25%-Überlappung ermittelt, um die Güte der Codierungen differenzierter einschätzen zu können. Weil die Definition einheitlicher Codiereinheiten vor Beginn des Auswertungsprozesses nicht zielführend gewesen wäre, wurde auf die Berechnung zufallskorrigierter Übereinstimmungs-Koeffizienten (Kappa) verzichtet, die nur bei entsprechend strukturierten Daten angemessen sind (vgl. Rädiker und Kuckartz 2019, S. 303; Kuckartz 2016, S. 216). Für die Beantwortung der Forschungsfragen erscheint es meist unerheblich, inwiefern genau codierte Segmente beim Intercoding überlappen, da vor allem das Vorhandensein einer Kategorie in einem Datensatz

entscheidend ist und nicht deren exakter Fundort im Text. Dementsprechend ist insbesondere die Intercoder-Übereinstimmung für das Vorhandensein der Kategorien geeignet zur Beurteilung der Codierungen.

Typenbildung

Die Forschungsergebnisse zeigen insgesamt Unterschiede zwischen den Studienteilnehmenden im Hinblick auf die Nutzung des Bildungswertes einer wissenschaftlichen Kontroverse im Unterricht. Aufgrund dessen werden in Kapitel 8.4 (ab S. 225) Typen gebildet, um diese Ergebnisse geeignet strukturieren zu können (vgl. Kuckartz 2010a, S. 98) und um die Unterschiedlichkeit der Befragten in Bezug auf die Nutzung des Bildungswertes bzw. die Auseinandersetzung mit einer wissenschaftlichen Kontroverse im Unterrichtskontext systematisch zu ordnen (vgl. Kuckartz 2016, S. 146; Kuckartz 2010b, S. 555). Dabei werden die Studienteilnehmenden so gruppiert, dass die Zugehörigen einer Gruppen (eines Typs) sich untereinander möglichst ähneln, während die Gruppen im Vergleich möglichst unterschiedlich sein sollen (vgl. Kelle und Kluge 2010, S. 85; Kuckartz 2010b, S. 555). Für die Typenbildung wurden nur möglichst vollständige Datensätze berücksichtigt (66% der Datensätze). Die Erarbeitung der Typen verlief entlang der von Kuckartz (2016, vgl. S. 147) vorgeschlagenen fünf Hauptphasen, die große Überschneidungen mit den vier Schritten der Typenbildung nach Kelle und Kluge (2010, vgl. S. 91 f.) zeigen:

1. *Festlegung des Merkmalsraumes* (vgl. Kuckartz 2016, S. 154 f.; Kelle und Kluge 2010, S. 91, 93):
   Die Bestimmung derjenigen Merkmale, nach denen die Fälle (die Teilnehmenden der Studie) in unterschiedlichen Typen klassifiziert werden sollen, wird von Kuckartz (2010b, vgl. S. 557) als zentraler Kern der Typenbildung angesehen. Die Auswahl der konkreten Unterscheidungsmerkmale orientiert sich dabei eng am Forschungsinteresse, zu untersuchen, inwiefern Physiklehrkräfte und Physiklehramtsstudierende den Bildungswert wissenschaftlicher Kontroversen für den Physikunterricht nutzen können. In Kapitel 8.4.1 (ab S. 225) wird die Auswahl hierfür geeigneter Merkmale beschrieben und begründet. Grundlage des daraus resultierenden Merkmalsraumes mit den jeweiligen Merkmalsausprägungen sind Kategorien, die bereits im Rahmen der inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse entstanden sind (vgl. Kelle und Kluge 2010, S. 94 f.) und dann im Prozess der Typenbildung durch Reduktion (vgl. Kuckartz 2016, S. 149 f.) weiter zusammengefasst wurden. Das Reduktionsverfahren erfolgte rekursiv, das heißt, durch die Synthese von Kategorien entstehen Typen, die selbst wiederum als Merkmale zur Bildung neuer Typen verwendet werden (vgl. Kelle und Kluge 2010, S. 89).

2. *Gruppierung der Fälle zur Bildung der Typen* (vgl. Kuckartz 2016, S. 147; Kelle und Kluge 2010, S. 91):
   In diesem Schritt wurden die Datensätze der Befragten entsprechend der Merkmalsausprägungen des Merkmalsraumes in Gruppen zusammengefasst. Anschließend wurden die Fälle einer Gruppe (eines Typs) miteinander verglichen, um deren Ähnlichkeit untereinander zu kontrollieren, während andererseits sichergestellt werden musste, dass sich die gebildeten Typen untereinander hinreichend unterscheiden (Fallkontrastie-

rung). Die so gebildeten Typen werden in Kapitel 8.4.2 (ab S. 227) dargestellt.

3. *Beschreibung der Typen* (vgl. Kuckartz 2016, S. 147, 157; Kelle und Kluge 2010, S. 92):
   Die gebildeten Typen werden auf Basis ihrer jeweiligen Merkmalsausprägungen charakterisiert. Zusätzlich wird für jeden Typ eine repräsentative Fallinterpretation durchgeführt, bei der ein Fall als prototypischer Repräsentant seines Typs vertieft dargestellt wird (vgl. Kuckartz 2016, S. 158).

4. *Zuordnung der einzelnen Fälle zu den Typen* (vgl. ebd., S. 147, 157):
   Alle Teilnehmenden der Studie mit vollständigem Datensatz werden genau einem Typ zugeordnet.

5. *Analyse von Zusammenhängen zwischen den Typen und weiteren Informationen* (vgl. ebd., S. 147 f., 158 f.):
   Die gebildeten Typen werden im Zusammenhang mit weiteren Informationen betrachtet, die nicht zum Merkmalsraum gehören, wie soziodemografische Daten (siehe Fragebogen 1). Konkret wurden die folgenden Informationen typenspezifisch ausgewertet:
   - Geschlecht
   - Gruppenzugehörigkeit: Lehrkräfte und Studierende
   - Alter bzw. Dienstjahre
   - Unterrichtserfahrung mit dem Thema *Spezielle Relativitätstheorie*

Die konkrete Umsetzung der einzelnen Phasen zur Bildung der Typen wird in Kapitel 8.4 (ab S. 225) beschrieben.

6 Entwicklung der Erhebungsinstrumente

6.1 Fragebogen 1 (Erhebung des Massekonzeptes)

Zur Untersuchung des Massekonzeptes (Vorwissen) der Befragten im Vorfeld der Auseinandersetzung mit der Kontroverse um die Relativität der Masse wurde Fragebogen 1 (siehe Anhang A1, S. 263) entwickelt. Mithilfe des Fragebogens soll bestimmt werden, ob die Befragten eher zu Ansatz 1 oder 2 (siehe Kapitel 3.1.1, ab S. 87) tendieren, das heißt, ob sie die Masse als eine geschwindigkeitsabhängige oder -unabhängige Größe betrachten.

Im Fragebogen werden geschlossene Items formuliert, bei denen die Teilnehmenden der Studie entweder eine ihrer Meinung nach korrekte Antwort auswählen (Aufgabe 1) oder gegebene Aussagen als wahr oder falsch einordnen (Aufgabe 2). Aufgabe 1 wurde in Anlehnung an Oas (2008, vgl. S. 6) formuliert, der Studierende mithilfe der in Kapitel 3.1.2 (S. 121) beschriebenen beiden Fragen zu ihren Massekonzepten befragte. Die Aussagen in Aufgabe 2 entsprechen einerseits Hauptaussagen zur Unterscheidung zwischen den beiden Ansätzen 1 und 2, wie sie in Tabelle 3.2 (siehe Kapitel 3.1.1, S. 100) gegenübergestellt werden (siehe Aussagen in den Items 2.2, 2.4 und 2.5 des Fragebogens). Andererseits bilden die Aussagen in den Items 2.1 und 2.3 Inhalte ab, wie sie auch in Schullehrbüchern dargestellt werden. So findet man in Schulbüchern (z. B. Ackermann et al. 2015, S. 461; Diehl et al. 2012, S. 354; Meyer und Schmidt 2016, S. 528) häufig Erläuterungen zur relativistischen Massenzunahme am Beispiel von Teilchen in Beschleunigern, was in Item 2.1 des berücksichtigt wurde. Die Aussage in Item 2.3 wurde direkt einer Textstelle des Lehrbuchs *Fokus Physik | Gesamtband SII* (vgl. Ackermann et al. 2015, S. 462) entlehnt. Diese Anknüpfungspunkte an das Fachwissen von Lehrkräften auf Schulniveau bzw. an Informationsquellen, mit denen Physiklehrkräfte in ihrem Berufsalltag arbeiten, begünstigen eine adressatengerechte Konzeption des Fragebogens.

Tabelle 6.1 (S. 168) zeigt, wie das Antwortverhalten im Fragebogen den beiden unterschiedlichen Massekonzepten (Ansatz 1 und 2) zugeordnet werden kann. Wird in Item 1.2 die zweite Antwortmöglichkeit „Ben liest von seiner Waage mehr als 80 kg ab." ausgewählt, ist das ein Hinweis auf die problematische Vorstellung, dass mit der Geschwindigkeit eines Objektes auch dessen Ruhemasse zunimmt (siehe Kapitel 3.1.2, Diskussionspunkt (12), S. 119) und somit ebenfalls ein Indiz für ein Massekonzept gemäß Ansatz 1 (mit relativistischer Masse). Den Items wurde in Anlehnung an Aslanides und Savage (2013, vgl. S. 3) zusätzlich eine Sicherheitsskala für jede Antwort hinzugefügt. Aslanides und Savage (2013) nutzen für jede Verständnisfrage in ihrem *Relativity Concept Inventory (RCI)* zusätzliche das Item

> Rate how confident you are in your answer:
> *guessing* | *unconfident* | *neutral* | *confident* | *certain* (ebd., S. 3),

um das tatsächliche Verständnis der Befragten besser beurteilen zu können. Für eine Gewichtung der Antworten im Fragebogen 1 wurde diese Idee mithilfe einer vierstufigen Skala (*sehr unsicher* bis *sehr sicher*) adaptiert (siehe Anhang A1, S. 263). Die Sicherheitsskala ermöglicht eine differenzierte Einschätzung im Hinblick auf das Massekonzept der Befragten, da die Selbsteinschätzung der eigenen Zuversicht für eine „korrekte“ Antwort die Aussagekraft der im Fragebogen 1 gewonnenen Informationen erhöht. Mithilfe der Sicherheitsskala können Antworten, bei denen sich die Befragten eher *sehr sicher* sind, gegenüber solchen mit nur geringer Sicherheit, stärker gewichtet werden. Sichere Antworten der Studienteilnehmenden bieten einen besseren Indikator für das jeweilige Massekonzept als unsicher gegebene Antworten (geratene Antworten spiegeln eher „zufällige“ Entscheidungen wider).

Tabelle 6.1: Zuordnung der Antworten im Fragebogen 1 zu den beiden Massekonzepten

Item	**Ansatz 1** (Pro $m(v)$)	**Ansatz 2** (Anti $m(v)$)
1.1	2., 3. Antwortmöglichkeit	1. Antwortmöglichkeit
1.2	1., 2., 3. Antwortmöglichkeit	1. Antwortmöglichkeit
2.1	wahr	falsch
2.2	falsch	wahr
2.3	wahr	falsch
2.4	wahr	falsch
2.5	falsch	wahr

Der Fragebogen wurde in drei Phasen erprobt und jeweils weiterentwickelt (siehe Abbildung 6.1, S. 169). Zunächst wurde das Instrument in einem Seminar für Lehramtsstudierende (8. Fachsemester) zur Speziellen Relativitätstheorie mit wenigen Teilnehmenden ($N = 4$) eingesetzt. Dabei stellte sich heraus, dass die dort verwendeten Items nicht den gewünschten Differenzierungseffekt zwischen den beiden Massekonzepten zeigten, da einige der verwendeten Aussagen gleichzeitig sowohl mit Ansatz 1 als auch mit Ansatz 2 als *wahr* bzw. *falsch* von den Studierenden interpretiert wurden. Die mangelnde Unterscheidbarkeit konnte im anschließenden Gespräch mit den Studierenden zur Auswertung des Fragebogens darauf zurückgeführt werden, dass unklar blieb, was mit „Masse“ gemeint ist - die „Ruhemasse“ oder die „relativistische Masse“ eines Objektes? Dementsprechend wurden Items ersetzt oder umformuliert, so dass deutlicher hervorgehoben werden konnte, aus welchem Bezugssystem heraus die Masse eines Objektes betrachtet wird. Als Verständnishilfe zur Aufgabe 1 wurde eine bildliche Darstellung ergänzt. Der überarbeitete Fragebogen wurde anschließend im Rahmen einer Lehrkräftefortbildung ($N = 5$) pilotiert und am Ende der Fortbildungsveranstaltung mit den teilnehmenden Physiklehrkräften besprochen, so dass gegebenenfalls auftretende Verständnisschwierigkeiten thematisiert werden konnten. Aufgrund der in der Pilotierung gesammelten Erfahrung mit dem Erhebungsinstrument, wurde ein Item verworfen und einige Formulierungen konnten weiter optimiert werden. Eine aktualisierte Version des Fragebogens wurde abschließend in einer Expertenbefragung von Physikdidaktikern ($N = 7$) begutachtet. Hierzu wurde der Fragebogen frei von den Experten kommentiert. In der Diskussion der Sicherheitsskala wurde sich für eine vierstufige Skala entschieden, um eindeutigere Ergebnisse erzielen zu

können (Vermeidung der Tendenz zur Mitte). Daneben waren in diesem Entwicklungsschritt kaum Anpassungen der Itemformulierungen notwendig. Der so entwickelte und in der Hauptstudie eingesetzte Fragebogen findet sich im Anhang A1 (S. 263).

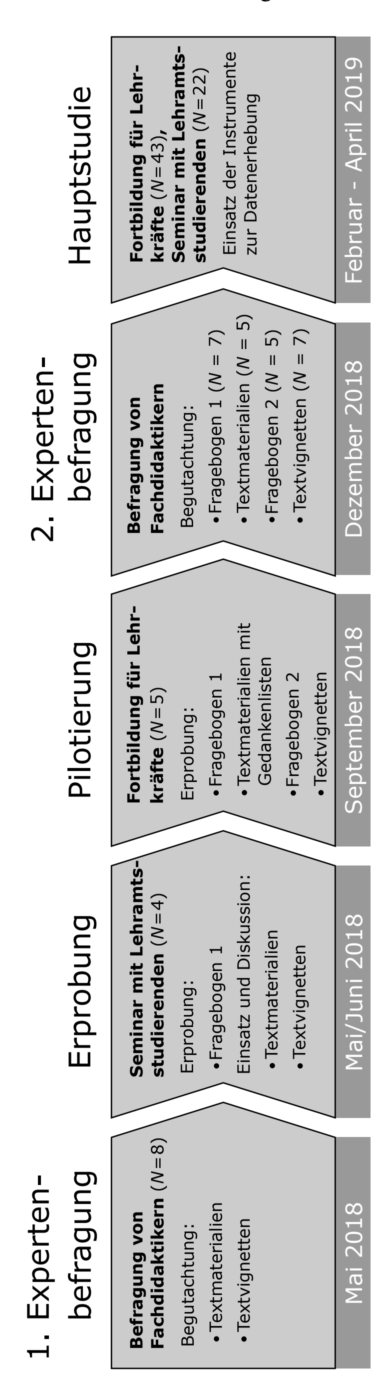


Abbildung 6.1: Entwicklungsprozess und Erprobung der Erhebungsinstrumente

6.2 Gedankenlisten und Fragebogen 2

Mithilfe von Gedankenlisten sollte erfasst werden, wie sich die Teilnehmenden der Studie in der präselektionale Phase des Entscheidungsprozesses (siehe Kapitel 5.2, Abbildung 5.2, S. 152) mit Informationen und Positionen einer wissenschaftlichen Kontroverse auseinandersetzen. Damit die Identifikation einer Entscheidungssituation, die Generierung der Optionen sowie die Informationssuche in einem solchen Entscheidungsprozess unter Laborbedingungen simuliert werden konnten, wurden die Studienteilnehmenden mit verschiedenen Textmaterialien in einer vorgegebenen Reihenfolge konfrontiert:

Material Nr. 1: Unterrichtsmaterialien:

- Auszug aus einem Physiklehrbuch für die Schule,
  Position: Ansatz 1 (Masse ist relativ)
- Auszug aus einem Unterrichtsmaterialheft (für Lehrkräfte),
  Position: Ansatz 2 (Masse ist invariant)

Material Nr. 2: curriculare Unterrichtsziele:

- Auszug aus dem sächsischen Lehrplan, Position: Ansatz 1
- Auszug aus dem türkischen Lehrplan[1], Position: Ansatz 2

Material Nr. 3: Auszüge aus Fachartikeln, Position: Ansatz 2

Material Nr. 4: Auszug aus einem Fachartikel, Position: Ansatz 1

Material Nr. 5: Auszug aus einem Fachartikel, Position: Ansatz 2

Material Nr. 6: Auszug aus einem Fachlehrbuch, Position: Ansatz 1

Material Nr. 7: Informationen zu experimentellen Daten und deren Interpretation:

- Darstellung einer Internetlernplattform, Position: Ansatz 1
- Auszug aus einem Fachartikel, Reflexion der Interpretation mit Ansatz 1 oder 2

Die Textmaterialien Nr. 1 und Nr. 2 wurden so ausgewählt, dass der Vergleich der dargebotenen Unterrichtsmaterialien und -zielvorgaben eine erste Konfrontation mit den beiden gegensätzlichen Ansätzen 1 und 2 ermöglichte. Anschließend wurde den Studienteilnehmenden für das Lesen der weiteren Textmaterialien die Leitfragen gestellt: „Wie würde ich die Thematik *Die Masse in der Speziellen Relativitätstheorie* in meinem eigenen Physikunterricht darstellen und vermitteln?“, um eine Entscheidungssituation auszulösen. Damit die Befragten bezüglich dieser Leitfrage verschiedene Informationen sichten konnten, um auch mögliche Handlungsoptionen zu entwickeln, wurden in den Textmaterialien Nr. 3 bis Nr. 7 Ausschnitte aus Fachartikeln

[1] Als einzige verfügbare Quelle für eine curricular festgeschriebene Verankerung des Ansatzes 2 (im Schulunterricht) konnte ein Ausschnitt aus dem türkischen Lehrplan gefunden werden. Der Bezug zu einem nationalen Lehr- bzw. Bildungsplan war an dieser Stelle leider nicht möglich.

bzw. Lehrbüchern präsentiert, so dass eine Auseinandersetzung mit den beiden Ansätzen 1 und 2 stattfinden konnte.

Diese Textmaterialien bilden als Informationsquellen zu den unterschiedlichen Positionen der wissenschaftlichen Kontroverse die Grundlage für die Gedankenauflistung. Ein wesentliches Kriterium für die Auswahl der Materialien war dabei deren Authentizität, so dass keine fiktiven, eigens erstellten Textmaterialien verwendet wurden. Dementsprechend sind die Materialien Nr. 1 und Nr. 2 so gewählt, dass direkte Anknüpfungspunkte zum Schulkontext bestehen. Um den Studienteilnehmenden auch für die Phase der Informationssuche authentische Materialien zur fachlichen Recherche bereitstellen zu können, wurden Ausschnitte aus Veröffentlichungen in Fachzeitschriften (bzw. eines Fachlehrbuchs) ausgewählt und ins Deutsche übersetzt. Alle Inhalte dieser Textausschnitte mussten dabei dem Fachwissen der Lehrkräfte angemessen sein. Die unterschiedlichen Autoren und Quellenangaben wurden für alle Textmaterialien deutlich hervorgehoben, so dass die prinzipielle Glaubwürdigkeit und Seriosität der Textausschnitte unterstrichen werden konnte, aber auch, um zu verdeutlichen, dass es sich nicht um konstruierte Texte handelt. Zur Verhinderung der Überrepräsentation einer der beiden Ansätze 1 und 2 wurden die Textausschnitte der Materialien Nr. 3 bis Nr. 7 so gewählt, dass die Anzahl der darin dargestellten Argumente insgesamt übereinstimmt, wie in Tabelle 6.2 dargestellt. Die Tabelle zeigt auch, dass sich einige der Argumente aufeinander beziehen, während gleichzeitig ein gewisses Spektrum verschiedener Argumentations- und Begründungsansätze abgebildet wird.

Tabelle 6.2: Argumente in den Textmaterialien für Ansatz 1 oder 2

Material	Position	Argumente im Material
Nr. 3	Ansatz 2	• in der Speziellen Relativitätstheorie ist die Masse dieselbe, wie in der Newtonschen Mechanik, sonst wären die relativistischen Gleichungen nicht mit denen der Newtonschen Mechanik vereinbar (Korrespondenzprinzip) *(siehe Diskussionspunkt (1) in Kapitel 3.1.2, S. 101)* • gravitative Wechselwirkung wird nicht von der Masse eines Körpers bestimmt, sondern von dessen Energie und Impuls *(siehe Diskussionspunkt (7) in Kapitel 3.1.2, S. 107)* • Ursache für die Einführung einer geschwindigkeitsabhängigen Masse ist die Verwendung der nichtrelativistischen Beziehung $p = mv$ anstelle des eigentlichen relativistischen Zusammenhangs $p = m\gamma v$ *(siehe Diskussionspunkt (5) in Kapitel 3.1.2, S. 106)*
Nr. 4	Ansatz 1	• Ansatz 2 ist im Vergleich zu Ansatz 1 schwieriger verständlich für Lernende, da nach Ansatz 2 die Masse eines Systems bei Energiezufuhr zunimmt, während die Massen der Teilchen dieses Systems unverändert bleiben *(siehe Diskussionspunkt (9) in Kapitel 3.1.2, S. 114)* • Ansatz 2 wird kritisch hinterfragt: Wie können Photonen keine Masse besitzen, aber dennoch von Objekten mit Masse angezogen werden? *(siehe Diskussionspunkt (8) in Kapitel 3.1.2, S. 112)*

Tabelle 6.2: Argumente in den Textmaterialien für Ansatz 1 oder 2 (Fortsetzung)

		• Ansatz 2 wird kritisch hinterfragt: Wie kann ein Photon Masse von einem Körper auf einen anderen übertragen, ohne selbst eine Masse zu besitzen? *(siehe Diskussionspunkt (8) in Kapitel 3.1.2, S. 112)*
Nr. 5	Ansatz 2	• der γ-Faktor in $p = m\gamma v$ ist kinematischen Ursprungs und wird durch die Relativität der Zeit verursacht *(siehe Diskussionspunkt (6) in Kapitel 3.1.2, S. 107)* • Ansatz 1 begünstigt die problematische Vorstellung, dass auch die Ruhemasse eines Objektes mit dessen Geschwindigkeit zunimmt *(siehe Diskussionspunkt (12) in Kapitel 3.1.2, S. 119)*
Nr. 6	Ansatz 1	• analog zur Zeitdilatation $t = \gamma\tau$ ist es legitim, die relativistische Masse $m_r = \gamma m_0$ einzuführen *(siehe Diskussionspunkt (2) in Kapitel 3.1.2, S. 102)* • die Trägheit eines Teilchens entsteht „im" Teilchen selbst und entstammt nicht den Eigenschaften der Raumzeit *(siehe Diskussionspunkte (6) und (7) in Kapitel 3.1.2, S. 107, 107)*
Nr. 7	Ansatz 1, 2	• experimentelle Ergebnisse zu bewegten Teilchen in einem Magnetfeld können mit Ansatz 1 und 2 geeignet interpretiert werden *(siehe Diskussionspunkt (11) in Kapitel 3.1.2, S. 118)*

Bis zur endgültigen Konzeption, Auswahl und Anordnung der Textmaterialien, wie oben beschrieben, durchliefen die Materialien verschiedene Entwicklungsphasen, in denen auch die Gedankenauflistung als Erhebungsmethode pilotiert werden konnte (siehe Abbildung 6.1, S. 169). In einem ersten Schritt wurden mögliche, in Frage kommende Textmaterialien von Physikdidaktikern ($N = 8$) hinsichtlich ihrer Eignung für die Datenerhebung unabhängig voneinander begutachtet. Dazu wurde von den Experten zum einen die Verständlichkeit und Sprache der Textmaterialien beurteilt (Kennzeichnung uneindeutiger, ungenauer oder sprachlich schwer verständlicher Textstellen). Zum anderen konnten im Rahmen einer freien Kommentierung Anmerkungen direkt im Material vorgenommen werden. Dies führte bereits zu einer ersten Überarbeitung und Eingrenzung der Textmaterialien. In einem physikdidaktischen Seminar zur Speziellen Relativitätstheorie mit Physiklehramtsstudierenden ($N = 4$) des 8. Fachsemesters konnten die überarbeiteten Materialien dann erstmalig erprobt werden. Dazu wurden die Textmaterialien den Studierenden im Seminar zum Lesen zur Verfügung gestellt und die Inhalte anschließend gemeinsam diskutiert. So konnten neben der reinen Lesedauer vor allem Verständnisschwierigkeiten und Auswirkungen der Materialreihenfolge in Erfahrung gebracht werden, was zu einer weiteren Überarbeitung der Auswahl und Zusammenstellung der Textmaterialien führte. In Verbindung mit der Erstellung von Gedankenlisten wurden die Textmaterialien dann im Rahmen einer Physiklehrkräftefortbildung ($N = 5$) als Erhebungsinstrument getestet. Die dabei entstandenen Gedankenlisten wurden anschließend systematisch hinsichtlich der folgenden Aspekte für jedes Textmaterial einzeln ausgewertet:

- Welche *Nature-of-Science*-Vorstellungen der Physiklehrkräfte lassen sich anhand der Gedankenlisten rekonstruieren?

- Mit welchen Gedanken reagieren die Befragten auf die dargebotenen Textmaterialien?
- Welche Bewertungskriterien werden von den Teilnehmenden in den Gedankenlisten im Hinblick auf den Entscheidungsprozess genannt?
- Welche Probleme treten bei der Auswertung der Gedankenlisten auf?

Aufgrund der Auswertung dieser Aspekte sowie der zu hohen Bearbeitungszeit bei der Datenerhebung insgesamt (90-120 min für Fragebogen, Gedankenlisten und Vignetten), wurden Textausschnitte gekürzt, teilweise verworfen und neu zusammengestellt, so dass die Argumente für die Ansätze 1 und 2 entsprechend der Tabelle 6.2 (S. 171) ausgewogen abgebildet werden. In der Instruktion zur Erstellung der Gedankenlisten wurde einerseits der Hinweis ergänzt, dass die Gedankenauflistung keine Zusammenfassung des gelesenen Materials sein soll und beispielhaft angeführt, was unter „Gedanken" verstanden werden kann. Für eine bessere Erfassung des persönlichen, begründeten fachlichen Urteils sowie der Lernziele im Anschluss an die Textmaterialien wurde Fragebogen 2 konzipiert. Abschließend erfolgte eine Beurteilung der aktualisierten Textmaterialien sowie der Instruktionen zur Erstellung der Gedankenlisten und Fragebogen 2 durch Physikdidaktiker ($N = 5$). Neben der erneuten Überprüfung der Verständlichkeit und Sprache sowie einer freien Kommentierung wurden die Sequenzierung der Instruktionen und Materialien entlang des Rahmenmodells für den Prozess des Entscheidens diskutiert und für den Einsatz in der Hauptstudie bestätigt.

6.3 Textvignetten

Um die Handlungsintentionen und -möglichkeiten von (zukünftigen) Lehrkräften sowie die von ihnen thematisierten *Nature-of-Science*-Aspekte im Zusammenhang mit wissenschaftlichen Kontroversen im Unterrichtskontext zu untersuchen, wurden vier verschiedene Textvignetten eingesetzt. Die Konzeption und Erstellung der Vignetten wurde in Anlehnung an die Konstruktion von Fällen, wie sie von Upmeier zu Belzen und Merkel (2014) beschrieben wird, in den folgenden drei Schritten durchgeführt:

1. *Festlegung des Ziels* (vgl. ebd., S. 205 f.):
   Die Textvignetten sollen als Erhebungsinstrument in einem qualitativen explorativen Design verwendet werden, um die Forschungsfragen FF 1.2, FF 2.1 a) und b) sowie FF 2.2 b) (siehe Kapitel 4.2, ab S. 143) zu untersuchen.

2. *Bestimmung des Inhaltes* (vgl. ebd., S. 207):
   Der Inhalt soll sich zum einen an der Praxis orientieren und zum anderen theoretisch verortet werden können (vgl. ebd.). Im Sinne der theoretischen Fundierung berücksichtigen die Inhalte der Textvignetten die jeweiligen Charakteristika von Phasen im Rahmenmodell für den Prozess des Entscheidens nach Betsch, Funke und Plessner (2011). Der Praxisbezug wird durch die Beschreibung problematischer Situationen im Unterrichts- bzw. Schulkontext hergestellt. Um dementsprechend auch typische Akteure aus dem schulischen Bereich in den Situationsbeschreibungen zu involvieren, werden sowohl eine andere Lehrkraft als auch Schüler und Eltern als „Protagonisten" in die Vignetten eingebunden. Für die konkreten Vignetteninhalte wurden fiktive Szenarien konstruiert, da entsprechend des Designs als Laborstudie an die Inhalte der Textmaterialien angeknüpft werden sollte und bereits vorhandene Erfahrungen aus der Schulpraxis im Umgang mit der wissenschaftlichen Kontroverse um die Relativität der Masse unwahrscheinlich bzw. schwer zugänglich sein dürften.

3. *Festlegung der Struktur* (vgl. ebd., S. 208 f.):
   Upmeier zu Belzen und Merkel (2014, Abb. 17.1, S. 206) empfehlen eine dreigeteilte Strukturierung:

   Abschnitt 1: Kontextinformationen

   Abschnitt 2: problematische Unterrichtssituation

   Abschnitt 3: Handlungsalternativen

Die Unterteilung der Textvignetten in diese drei Abschnitte ist in Abbildung 6.2 (S. 175) exemplarisch für Vignette 2B dargestellt und wurde wie folgt realisiert (vgl. ebd., S. 208 f.): Der erste Abschnitt einer Vignette enthält alle notwendigen Informationen zu den als gegeben anzusehenden Bedingungen einer Situation (z. B. auch Jahrgangsstufe, Unterrichtsthema). Im zweiten Abschnitt wird eine problembehaftete Situation im Kontext von Schule und Unterricht beschrieben. Dabei wurden mono- bzw. dialogische Elemente für eine authentische, möglichst praxisnahe Darstellung verwendet. Um eine Lenkung der Befragten zu vermeiden, enthalten die Vignetten keine vorgegebenen Handlungsoptionen zur Auflösung der Situation. Da die

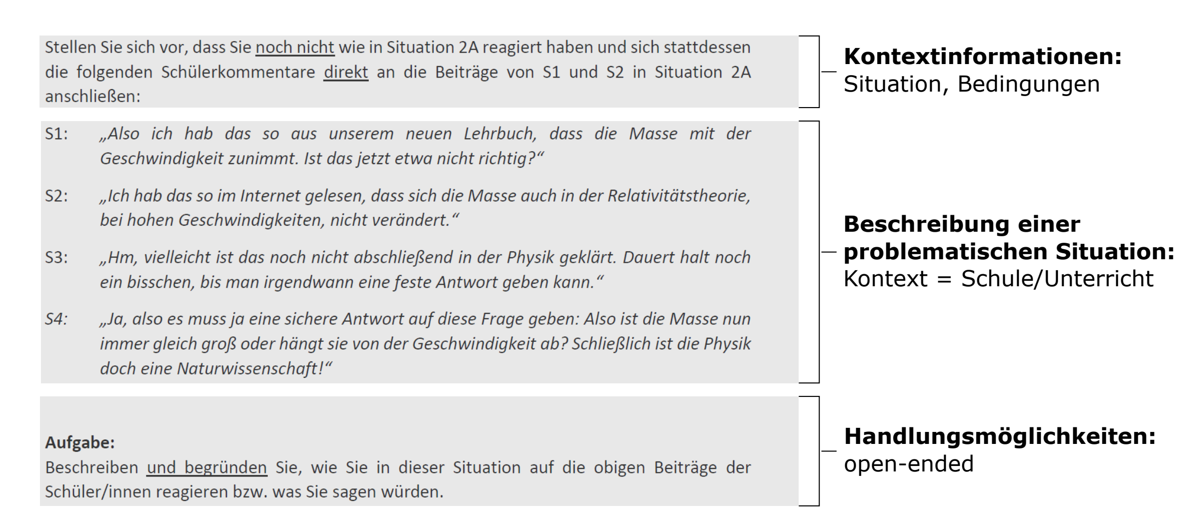


Abbildung 6.2: Struktur der Textvignetten

Textvignetten als „open-ended cases“ (ebd., S. 209) konstruiert sind, werden die Befragten im letzten Abschnitt aufgefordert, selbst eine solche Lösung (Handlungsmöglichkeiten) zu finden und diese zu begründen.

Für die Entwicklung der Vignetten wurden darüber hinaus die folgenden zehn Konstruktionskriterien festgelegt:

Die Vignetten sollen ...

(1) ... Situationen darstellen, in denen sich die Befragten entscheiden oder positionieren müssen (**Entscheidungs-** bzw. **Beurteilungssituationen**). (vgl. Sander und Höttecke 2014, S. 2)

(2) ... die Befragten in **komplexe** Situationen versetzen. (vgl. Brovelli et al. 2013, S. 310)

(3) ... die Befragten in möglichst **authentische, praxisnahe** Situationen (Schulkontext) versetzen. (vgl. Brovelli et al. 2013, S. 309 f.; Streit und Weber 2013, S. 988)

(4) ... **professionsbezogen** sein. (Das heißt, die Vignetten sollten sich in einem nicht zu weiten Sinn auf den Unterricht beziehen.) (vgl. Streit und Weber 2013, S. 988)

(5) ... eine in sich **abgeschlossene** Situation darstellen. (vgl. ebd.)

(6) ... möglichst **kurz**, jedoch **hinreichend detailliert** sein. (vgl. ebd.)

(7) ... **keine** Situationen darstellen, die in der **Vergangenheit** liegen. (vgl. Mummendey und Grau 2014, S. 52)

(8) ... die Befragten dazu anregen, eine **konkrete Reaktion** (Handlungsmöglichkeit bzw. Antwort) zu beschreiben. (vgl. Streit und Weber 2013, S. 988; Schnurr 2003, S. 393)

(9) ... die Befragten dazu auffordern, die von ihnen genannte Reaktion (Handlungsmöglichkeit bzw. Antwort) zu **begründen**. (vgl. Streit und Weber 2013, S. 988; Schnurr 2003, S. 393, 397)

(10) ... den Befragten **Offenheit** in Bezug auf Handlungs- und Antwortmöglichkeiten bieten (mehrere verschiedene Reaktionen sind denkbar). (vgl. Schnurr 2003, S. 397; Bierhoff und Petermann 2014, S. 175, 177; Tepner und Dollny 2014, S. 312; Bächtold, Cross und Munier 2019, S. 6)

Das erste Kriterium schließt daran an, wissenschaftliche Kontroversen für (zukünftige) Lehrkräfte als Entscheidungssituation hinsichtlich der Darstellung im Unterricht zu betrachten (siehe Kapitel 2.5, ab S. 84). Eine besondere Priorität in der Kriterienliste haben die Komplexität (2) und Authentizität (3) der Textvignetten, da Brovelli et al. (2013, vgl. S. 310) auf deren Bedeutung für die ökologische Validität hinweist.

Die Erprobung, Entwicklung und Auswahl der Textvignetten fand in vier verschiedenen Entwicklungsphasen statt (siehe Abbildung 6.1, S. 169). Mit Orientierung an den oben genannten Konstruktionskriterien wurden zu Beginn acht Textvignetten ausgearbeitet, die anschließend in einer ersten Expertenbefragung von Physikdidaktikern ($N = 8$) begutachtet wurden. Hierzu wurden sowohl Verständlichkeit und Sprache (Eindeutigkeit, Genauigkeit) der Vignetten von den Experten beurteilt, als auch eine freie Kommentierung vorgenommen. Zur Überprüfung und Verbesserung der Qualität der Vignetten als Erhebungsinstrumente wurden die zehn zuvor festgelegten Konstruktionskriterien von den Experten mit Hilfe einer verbalen sechsstufigen bipolaren Ratingskala (siehe Anhang A.5.1, S. 282) eingeschätzt. Für die Erfassung der Komplexität der Vignetten wurde zusätzlich das Modell professioneller Handlungskompetenz nach Baumert und Kunter (2006) herangezogen. Mithilfe dieses heuristisch entwickelten Modells kann die Handlungskompetenz von Lehrkräften gemäß der folgenden vier Aspektbereiche beschrieben werden: motivationale Orientierungen, Überzeugungen bzw. Werthaltungen, selbstregulative Fähigkeiten und Professionswissen. Ein ganz ähnliches Modell zur professionellen Handlungskompetenz von Lehrkräften, speziell für den Bereich Physik, wird von Riese und Reinhold (2010) vorgelegt, die mit ihrem Modell direkt an Baumert und Kunter (2006) anknüpfen. Um die Komplexität der Textvignetten beurteilen zu können, wurde eingeschätzt, inwiefern die unterschiedlichen Kompetenzaspekte des Modells bei der Bearbeitung der Vignetten eine Rolle spielen könnten. Die Experten ordneten dazu jeder Vignette alle Aspekte des Modells professioneller Handlungskompetenz zu, die von dieser Vignette erfasst werden. Für die Zuordnung stand den Experten eine Beschreibung der einzelnen Modellaspekte nach Baumert und Kunter (2006), Borowski et al. (2010), Brovelli et al. (2013), Rabe, Meinhardt und Krey (2012), Riese (2009) und Tepner et al. (2012) zur Verfügung (siehe Anhang A.5.3, S. 288). Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse durch die Einschätzung anhand der Konstuktionskriterien, insbesondere der Komplexität, wurden Vignetten verworfen, überarbeitet und auch neu ausgearbeitet, so dass im weiteren Entwicklungsprozess acht neue Textvignetten erprobt werden konnten. In einem zweiten Schritt wurden diese Vignetten im Rahmen eines physikdidaktischen Seminars für Lehramtsstudierende des 8. Fachsemesters ($N = 4$) als Diskussionsanlass nach der individuellen Bearbeitung unterschiedlicher Vignetten eingesetzt. Aufgrund des Austauschs im Seminar und der Auswertung der Antworten der Studierenden

im Anschluss konnten die Vignetten weiterentwickelt und teilweise neu konzipiert bzw. verworfen werden. Der so aktualisierte Satz von acht Textvignetten konnte danach während einer Lehrkräftefortbildung für Physiklehrkräfte des Gymnasiums ($N = 5$) als Erhebungsinstrument pilotiert werden. Dabei erhielt jede Lehrkraft eine Auswahl von je fünf Vignetten. Die Antworten der befragten Lehrkräfte wurden anschließend systematisch hinsichtlich der folgenden vier Aspekte für jede Textvignette einzeln ausgewertet:

- Welche Handlungsmöglichkeiten werden von den Physiklehrkräften genannt?
- Welche *Nature-of-Science*-Aspekte werden von den Physiklehrkräften genannt?
- Welche Bewertungskriterien werden von den Physiklehrkräften im Hinblick auf den Entscheidungsprozess genannt?
- Welche Probleme treten bei der Erhebung und Auswertung der Daten zu den Textvignetten auf?

Aufgrund dessen und der noch zu hohen Bearbeitungszeit wurden vier der acht Textvignetten für den Einsatz in der Hauptstudie ausgewählt. Die Reihenfolge dieser vier Vignetten wurde entsprechend des Rahmenmodells für den Prozess des Entscheidens festgelegt (siehe Abbildung 5.2, S. 152). In Vignette 2B wurden die fiktiven Schüleräußerungen so angepasst, dass sie eher eine Antwort der Befragten im Zusammenhang mit *Nature of Science* provozieren können. Dazu wurden die Schüleräußerungen so umformuliert, dass die typische Schülervorstellung ausgedrückt wird, naturwissenschaftliche Erkenntnisse seien sicher und feststehend (vgl. Höttecke 2001, S. 21). In einem abschließenden Entwicklungsschritt wurden die Textvignetten einer weiteren Experteneinschätzung ($N = 7$) unterzogen. Erneut fand dabei neben der freien Kommentierung der Vignetten eine Prüfung der sprachlichen Verständlichkeit statt. Bei der Bewertung der Vignetten anhand der zehn Konstruktionskriterien zeigten sich durchgängig sehr gute Ergebnisse (siehe Anhang A.5.2, S. 286). Auch die festgelegte Reihenfolge der Textvignetten im Erhebungsinstrument und deren Passung zu den Phasen im Modell des Entscheidens wurde durch die Physikdidaktiker positiv beschieden. Mit einer kleinen Gruppe der Physikdidaktik-Experten ($N = 4$) erfolgte eine Prüfung der Komplexität der vier Vignetten. Hierzu wurde bereits im Vorfeld der Expertenbefragung eine Zuordnung der Kompetenzaspekte gemäß des Modells professioneller Handlungskompetenz zu den Textvignetten als Basis für einen Vergleich mit der Einschätzung der Experten erstellt. Die Physikdidaktiker wurden daraufhin gebeten, analog zur ersten Expertenbefragung, unabhängig voneinander die Kompetenzaspekte den Textvignetten zuzuordnen und anschließend offen zu diskutieren. Alle Ergebnisse des Vergleichs der verschiedenen Zuordnungen werden im Anhang A.5.4 (S. 290) angeführt. Bei einer Übereinstimmung von mindestens drei der vier Experten mit der Zuordnungsvorlage wurde ein Kompetenzaspekt als bedeutsam für eine bestimmte Textvignette akzeptiert. Daraus ergaben sich die in Tabelle A.6 (siehe Anhang A.5.4, S. 294) dargestellten Profile der vier Textvignetten. Tabelle A.6 zeigt, dass jede Vignette für sich betrachtet durchaus mehrere unterschiedliche Kompetenzaspekte abdecken kann. Auch wenn in der Auseinandersetzung mit einer der Textvignetten bei der Befragung nicht zwangsläufig alle angegebenen Kompetenzaspekte bei den Studienteilnehmenden zum Tragen kommen müssen, so sind die

in Tabelle A.6 genannten Aspekte hierbei wenigstens potentiell bedeutsam. Insofern wird von einer hinreichenden Komplexität der Textvignetten ausgegangen. Die Sichtung der Textvignetten durch die Physikdidaktiker bedingte keine relevanten Änderungen an den Vignetten, so dass diese in der Hauptstudie eingesetzt werden konnten.

7 Beschreibung der Stichprobe

In diesem Kapitel werden die an der Studie teilnehmenden Physiklehrkräfte und Physiklehramtsstudierenden in Bezug auf wesentliche Merkmale zu deren Charakterisierung beschrieben und grundlegende Überlegungen zum Sampling dargelegt.

Da für die Untersuchung der Forschungsfragen (siehe Kapitel 4.2, ab S. 143) die Repräsentativität der Stichprobe hinsichtlich soziodemografischer Daten oder anderer Unterscheidungsmerkmale nicht von Bedeutung ist, erfolgte keine zufällige Auswahl der Studienteilnehmenden (vgl. Schreier 2010, S. 241). Entsprechend des qualitativen, explorativen Designs der Studie wurde sich an den Zielen und Prinzipien des *theoretical sampling* orientiert, Fälle mit „theoretischer Relevanz" (Kelle und Kluge 2010, S. 40) zu berücksichtigen. Demnach sollen die für die Untersuchung ausgewählten Fälle das Spektrum der verschiedenen Ausprägungen von Merkmalen abbilden, die aufgrund theoretischer Vorüberlegungen als relevante Auswahlkriterien festgelegt wurden (vgl. ebd., S. 41). Die ausgewählten Fälle sollen sowohl Ähnlichkeiten als auch Unterschiede (Kontrastierung) bezüglich dieser Merkmale aufweisen (vgl. ebd., S. 43, 48; Schreier 2010, S. 244). Als möglicherweise theoretisch relevant erschienen im Vorfeld der Studie folgende Merkmale:

- *Geschlecht*
- Erfahrung: Das jeweilige Erfahrungswissen der Befragten im Umgang mit (im weitesten Sinne) kritischen Unterrichtssituationen könnte unterschiedliche Handlungsmöglichkeiten im Unterrichtskontext (siehe Situationen in den Textvignetten) bedingen. Um den Erfahrungsumfang der Befragten zu berücksichtigen, stellen *Alter* und *Dienstjahre* wichtige Merkmale der Stichprobe dar.
- spezifisches thematisches Vorwissen: Das Vorwissen im Bereich der Speziellen Relativitätstheorie (thematischer Erhebungskontext) könnte gegebenenfalls relevant bei der Auseinandersetzung mit der Kontroverse um die Relativität der Masse sein. Dementsprechend kann *Unterrichtserfahrung zum Thema Spezielle Relativitätstheorie* ein wichtiger Faktor sein, da bereits physikalische Erklärungsmuster vorhanden sind, die mitunter in Frage gestellt werden. Auch das eigene *Massekonzept* der Befragten im Vorfeld der Auseinandersetzung mit der Kontroverse zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse in der Relativitätstheorie kann hier eine Rolle spielen.

Neben den oben genannten Merkmalen wäre möglicherweise auch die jeweilige Schulart (bzw. der Lehramtsstudiengang), in der unterrichtet wird (bzw. werden soll), von Interesse. Aufgrund der Entscheidung für die Thematik der Relativität der Masse in der Speziellen Relativitätstheorie als exemplarischer Erhebungskontext liegt allerdings ein starker curricularer Bezug zur gymnasialen Oberstufe vor. Um hinreichend viele Studienteilnehmende mit unterschiedlichen Ausprägungen der Merkmale *Geschlecht*, *Alter* und *Dienstjahre*, *Unterrichtserfahrung zum*

Thema Spezielle Relativitätstheorie und *Massekonzept* gewinnen zu können, wurden Lehrkräfte im Rahmen mehrerer (identischer) Fortbildungen akquiriert. Die Studierenden wurden im Zuge eines fachdidaktischen Seminars mit dem Schwerpunkt moderne Physik befragt. Im Sinne der Berücksichtigung notwendigen Vorwissens zum Themenbereich Spezielle Relativitätstheorie wurde sich dabei für ein Seminar entschieden, an dem Lehramtsstudierende in eher höheren Semestern gegen Ende ihres Studiums teilnehmen. Hierdurch konnte allerdings eine Varianz der Fachsemester - analog zu den Dienstjahren der Lehrkräfte - zu Gunsten der Beachtung des physikalischen Vorwissens nur sehr gering einbezogen werden.

Im Folgenden soll die Stichprobe genauer beschrieben werden, um die Heterogenität der Befragten (vgl. Kelle und Kluge 2010, S. 109) hinsichtlich der genannten Merkmale darzustellen. An der Hauptstudie nahmen insgesamt 65 Befragte teil, davon 43 Physiklehrkräfte aus Sachsen und 22 Physiklehramtsstudierende der TU Dresden. Eine Übersicht der Studienteilnehmenden findet sich in Anhang D (Tabelle D.1, S. 379 und Tabelle D.2, S. 381). Von den Lehrkräften unterrichten 37 an Gymnasien und 4 an Berufsbildenden Schulen (2 Sonstige). Ein Großteil der Lehrkräfte besitzt eine weitere Lehrbefähigung im Fach Mathematik (36), während nur ein kleiner Teil Informatik (6), Astronomie (2), Latein (1) oder Technik (1) nennt. Lediglich einer der Lehrkräfte gab an, derzeit nicht das Fach Physik zu unterrichten. Die Lehramtsstudierenden waren alle im Studiengang Lehramt an Gymnasien immatrikuliert. Häufigstes Zweitfach der Lehramtsstudierenden ist ebenfalls Mathematik (10), gefolgt von Informatik (4), Geografie (2), Latein (2) sowie Deutsch, Geschichte, Ethik/Philosophie und Musik (je 1).

Geschlecht:
Wie in Abbildung 7.1 zu sehen, überwiegt bei den Lehrkräften leicht der Anteil der Frauen (58%) gegenüber den Männern (42%), während bei den Studierenden der Anteil der Studenten (64%) größer im Vergleich zu dem der Studentinnen (36%) ist.



Abbildung 7.1: (a) Verteilung der Geschlechter bei den Lehrkräften
(b) Verteilung der Geschlechter bei den Studierenden

Alter und *Dienstjahre*:
Die Studierenden sind alle im Alter zwischen 20 und 30 Jahren (19 in der Altersgruppe 20-25 Jahre, 3 in der Altersgruppe 26-30 Jahre) und befinden sich im achten (12), sechsten (2), zehnten (1), neunten (1) oder fünften (1) Semester ihres Studiums (5 keine Angabe). Bei den Lehrkräften ist ein Drittel jünger als 50 Jahre (Verteilung der Altersgruppen siehe Abbildung 7.2). Etwa ein Zehntel der Lehrkräfte besitzt nicht mehr als zehn Jahre Berufserfahrung, 70% arbeiten seit mehr als 20 Jahren im Schuldienst (siehe Abbildung 7.2).

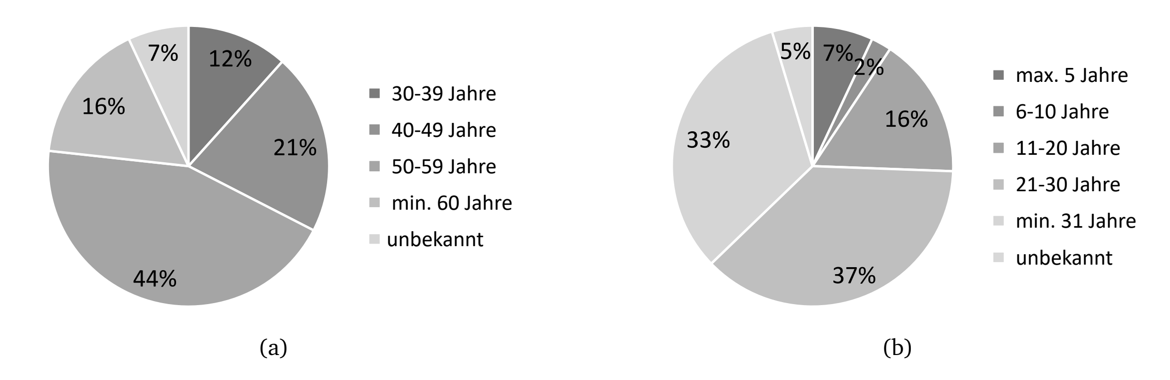


Abbildung 7.2: (a) Verteilung der Altersgruppen bei den Lehrkräften
(b) Verteilung der Dienstjahre bei den Lehrkräften

Unterrichtserfahrung zum Thema Spezielle Relativitätstheorie:
Von den Lehramtsstudierenden konnte noch niemand Unterrichtserfahrung zum Thema Spezielle Relativitätstheorie sammeln. Bei den Lehrkräften gaben 30 (70%) an, das Thema bereits in der Schule unterrichtet zu haben, davon 24 auch im Leistungskurs. 12 Lehrkräfte haben keinerlei Lehrerfahrung mit der Fachthematik.

Massekonzept:
Welches Massekonzept bei den Befragten im Vorfeld der Auseinandersetzung mit der wissenschaftlichen Kontroverse um die Relativität der Masse vorliegt, wird in Kapitel 8.1 (ab S. 183) genauer beschrieben. An dieser Stelle soll lediglich festgehalten werden, dass Ansatz 1 (geschwindigkeitsabhängige Masse) sowohl unter den Lehrkräften (35) als auch unter den Studierenden (15) am häufigsten vorkommt. Dennoch enthält die Stichprobe Befragte (Lehrkräfte: 6, Studierende: 2), deren Massekonzept eher Ansatz 2 (geschwindigkeitunsabhängige Masse) zugeordnet werden kann. Bei insgesamt 7 Studienteilnehmenden (Lehrkräfte: 2, Studierende: 5) war eine Zuordnung zu einem der beiden Massekonzepte nicht möglich.

Wie oben dargestellt, repräsentiert die Stichprobe eine Bandbreite unterschiedlicher Merkmale bzw. deren Ausprägungen. Nach der Idee des *theoretical sampling* ist der Stichprobenumfang genau dann ausreichend, wenn die Theorieentwicklung durch Vergrößerung der Stichprobe nicht weiter voranschreitet und insofern ein Maß an Sättigung erreicht wird (vgl. Schreier

2010, S. 244). Kelle und Kluge (2010, S. 49) bestimmen diesen Sättigungseffekt dadurch, dass „keine theoretisch relevanten Ähnlichkeiten und Unterschiede mehr im Datenmaterial entdeckt werden können". Da die vorliegende empirische Studie nicht der Theorieentwicklung diente, muss das Prinzip der Sättigung auf das Design dieser Studie übertragen werden. Eine Sättigung der Untersuchung wird hier im Hinblick auf die folgenden beiden Punkte erreicht:

- *Sättigung der Kategoriensysteme*:
  Wie bereits in Kapitel 5.4 (ab S. 160) erläutert, konnte bereits nach Codierung von etwa 40% des vorhandenen Materials eine Sättigung der Kategorien erreicht werden. Dies zeigt, dass bereits alle für die Forschungsfragen relevanten Inhalte durch die Kategoriensysteme erfasst werden und auch bei Ausweitung der Codierungen auf die verbliebenen 60% des Datenmaterials keine neuen Kategorien hinzukommen.

- *Sättigung theoretisch erwartbarer Typen*:
  Im Hinblick auf das Erkenntnisinteresse dieser Studie wurden verschiedene Typen gebildet (siehe Kapitel 8.4, ab S. 225). Gemäß des definierten Merkmalsraumes umfasst die Typologie alle theoretisch erwartbaren Kombinationen an Merkmalsausprägungen (Typen), da die Dimensionen *eigene Position* und *Nature of Science* nur dann ein sinnvolles Unterscheidungsmerkmal für die Typenbildung darstellen, wenn das Merkmal *Kontroversität* die Ausprägung *ja* besitzt. Das heißt, Typen mit den Eigenschaften

  - *nicht kontrovers* und *neutral* (keine Position wird vertreten) oder
  - *nicht kontrovers* und *Nature-of-Science-Aspekte werden thematisiert* (im Zusammenhang mit der wissenschaftlichen Kontroverse; siehe Bildungswert wissenschaftlicher Kontroversen im Bereich von *Nature of Science*)

  kommen schon rein logisch nicht vor, so dass maximal fünf verschiedene Typen aufgrund der Dimensionen des Merkmalsraumes zu erwarten sind. Da tatsächlich jedem dieser fünf Typen verschiedene Studienteilnehmende zugeordnet werden können (siehe Kapitel 8.4.3, ab S. 234), wird die gefundene Typologie in diesem Sinne als gesättigt betrachtet.

Insofern genügt das Sample den Ansprüchen des hier gewählten qualitativen, explorativen Designs.

8 Ergebnisse der Laborstudie

8.1 Massekonzept der Befragten

Um ermitteln zu können, inwiefern die Studienteilnehmenden vor der Auseinandersetzung mit der wissenschaftlichen Kontroverse um die Relativität der Masse zu Ansatz 1 (geschwindigkeitsabhängige Masse) oder Ansatz 2 (geschwindigkeitsunabhängige Masse) tendieren, wurde Fragebogen 1 (siehe Anhang A, S. 263) ausgewertet. Hierzu wurden die Antworten der Befragten entsprechend der Selbsteinschätzung anhand der vorgegebenen Sicherheitsskala gewichtet, um Antworten, bei denen die Befragten zuversichtlicher waren, stärker berücksichtigen zu können. Die konkreten Ergebnisse der Auswertung des Fragebogens finden sich für alle Studienteilnehmenden im Anhang E.1 in den Tabellen E.4 (S. 385) und E.5 (S. 387). Anschließend wurden die Gedankenlisten aller Befragten nach Hinweisen auf bereits vorliegende Massekonzepte (Vorwissen) durchsucht, um gegebenenfalls eine Triangulation des Fragebogen-Befunds zu ermöglichen. Dabei wurden die Gedankenauflistungen für die Textmaterialien 1 und 2 gesichtet, da entsprechend des Rahmenmodells für den Prozess des Entscheidens (siehe Abbildung 5.2, S. 152) hier die Konfrontation mit den beiden verschiedenen Ansätzen realisiert wurde und erst die Auseinandersetzung mit den im Verlauf der Laborstudie folgenden Textmaterialien die eigene Position beeinflussen dürfte. Die in den Gedankenlisten gefundenen Hinweise auf das Massekonzept der Befragten werden für die jeweiligen Studienteilnehmenden in den Tabellen E.6 (S. 388) und E.7 (S. 390) zusammengefasst. Die Einschätzung des Massekonzepts anhand der Gedankenlisten führte im Vergleich mit den Ergebnissen des Fragebogens zu einer resultierenden Bewertung, welches Massekonzept im Vorfeld der Auseinandersetzung mit der wissenschaftlichen Kontroverse vorlag. Diese Zusammenführung der Ergebnisse wird in den Tabellen E.8 (S. 392) und E.9 (S. 393) gezeigt.

Insgesamt zeigt sich (siehe Tabelle 8.1, S. 184), dass rund 80% der Lehrkräfte und etwa zwei Drittel der Studierenden die Masse als relative (geschwindigkeitsabhängige) Größe ansehen (siehe Abbildung 8.1a, S. 185). Dieses Ergebnis entspricht damit der Erwartung, dass nicht zuletzt aufgrund der Inhalte von Schullehrbüchern und Lehr- bzw. Bildungsplänen, wie in Kapitel 3.3.1 (ab S. 126) erläutert, davon ausgegangen werden kann, dass die Mehrheit der Physiklehrkräfte das Bild einer relativistischen, geschwindigkeitsabhängigen Masse vertritt. Sowohl bei den Lehrkräften als auch bei den Studierenden ist der Anteil derjenigen, die Masse als eine invariante Größe betrachten, gering. Dabei müssen Befragte, die diesem Massekonzept zugeordnet werden können, nicht zwangsläufig über relativistische Vorstellungen einer invarianten Masse (Ansatz 2) verfügen. Oftmals entspricht das Verständnis der physikalischen Größe Masse wahrscheinlich einfach dem der Newtonschen Physik, in der die Masse ebenfalls unabhängig vom Bezugssystem und damit von der Geschwindigkeit eines Objektes ist. Insofern ist schlicht nicht bekannt, dass die Masse in der Relativitätstheorie teilweise als

relative, bezugssystemabhängige Größe beschrieben wird. Dementsprechend ließe sich zum Beispiel auch die Aussage einer Lehrkraft zu Beginn der Gedankenauflistung einordnen:

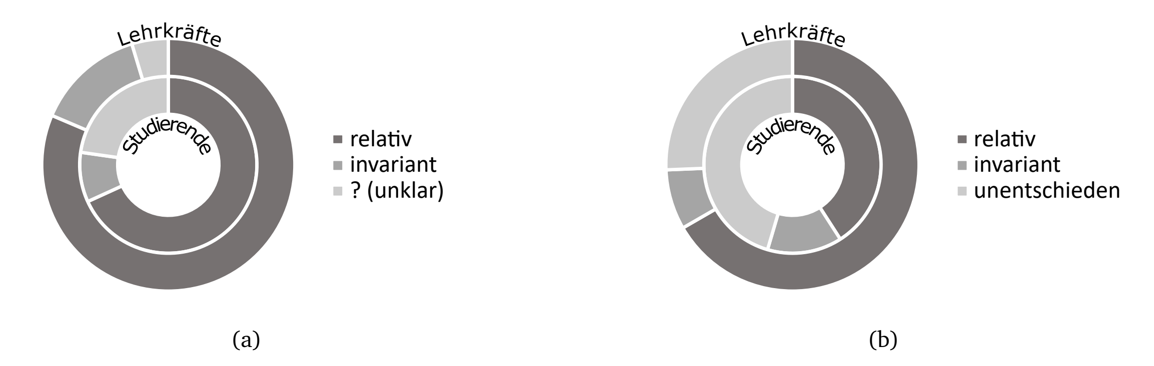
> bislang war die Masse eines Körpers für mich eine Konstante, ortsunabhängige Größe* (da Neutronen, Protonen [und Elektronen] ein konkreter Wert zugeordnet ist → Tafelwerk)
> *bereits die Fragen im einführenden „Test“ haben mich verwundert und ahnen lassen, dass ich etwas nicht weiß [...]
> wieso wurde mir nie gelehrt, dass es eine sog. relativistische Masse gibt?
> → selbst an der Uni (4 Semester Physik) kam es nicht dazu (L27F4)

Bei einem Teil der Befragten war eine geeignete, möglichst eindeutige Zuordnung zu einem relativen oder invarianten Verständnis von Masse anhand der Daten nicht möglich („? (unklar)“). Unter den Studierenden sind das immerhin fast ein Viertel der Befragten. Dieser vergleichsweise hohe Anteil könnte als Hinweis darauf interpretiert werden, dass unter den Studierenden seltener als bei den Lehrkräften eine bereits vorhandene, gefestigte und fachlich sichere Position vorliegt.

Tabelle 8.1: Massekonzepte der Befragten vor der Auseinandersetzung mit der wissenschaftlichen Kontroverse (Fragebogen 1)

	Lehrkräfte	Studierende
relativ	35	15
invariant	6	2
? (unklar)	2	5

Nach der Auseinandersetzung mit den verschiedenen Textmaterialien zur Frage nach der Relativität der Masse wurden die Befragten in Fragebogen 2 (Item 1) um eine kurze fachliche Einschätzung gebeten. Dabei sollte beurteilt werden, ob in der Speziellen Relativitätstheorie gilt, dass die Masse eines Teilchens mit seiner Geschwindigkeit zunimmt. Das heißt, ob die Masse abhängig vom Bezugssystem, also nicht invariant ist (siehe Anhang A, S. 277). Je nach dem, ob diese Aussage als wahr (relativistische Masse) oder falsch (invariante Masse) bewertet wurde, konnte die fachliche Position im Hinblick auf das Massekonzept nach dem Lesen der Textmaterialien (Gewinnung von Informationen zur wissenschaftlichen Kontroverse) ermittelt werden. Die Ergebnisse dieser Befragung werden für alle Studienteilnehmenden einzeln im Anhang E.1 in den Tabellen E.8 (S. 392) und E.9 (S. 393) angeführt und sind in Tabelle 8.2 (S. 185) zusammengefasst. Darin zeigt sich, dass der Anteil derer, die einem relativistischen Massekonzept zugeordnet werden können, jeweils bei den Lehrkräften als auch bei den Studierenden gesunken ist. Während der Anteil der Befragten mit einem invarianten Masseverständnis weiterhin gering bleibt, ist ein bemerkenswerter Teil der Studienteilnehmenden nun unentschieden in Bezug auf die Relativität der Masse (siehe auch Abbildung 8.1b, S. 185). Bei den Studierenden gibt fast die Hälfte an, keine Entscheidung hierzu treffen zu können, was



(a) (b)

Abbildung 8.1: (a) Massekonzepte der Befragten (außen: Lehrkräfte, $N = 43$ | innen: Studierende, $N = 22$) vor der Auseinandersetzung mit der wissenschaftlichen Kontroverse (Fragebogen 1)
(b) Massekonzepte der Befragten (außen: Lehrkräfte, $N = 39$, 4 keine Angabe | innen: Studierende, $N = 22$) nach der Auseinandersetzung mit der wissenschaftlichen Kontroverse (Fragebogen 2)

im Vergleich zu den Lehrkräften einem deutlich höheren Anteil entspricht. Dies wäre vereinbar mit der Interpretation der Ergebnisse zu Fragebogen 1, in dem Studierende möglicherweise aufgrund eines weniger gefestigten und im Laufe eigener Lehrerfahrungen verstetigtem Verständnisses des physikalischen Sachverhalts seltener als die Lehrkräfte einem Massekonzept zugeordnet werden können. Der verhältnismäßig hohe Anteil der Studierenden, die sich im Fragebogen 2 nicht auf eine Position festlegen möchten, könnte ebenfalls ein Hinweis darauf sein, dass die Studierenden häufiger offen für die unterschiedlichen Positionen der Kontroverse sind und seltener über feststehende fachliche Positionen verfügen. In jedem Fall spiegelt die Auswertung des ersten Items von Fragebogen 2 wider, dass einige der Befragten nach der inhaltlichen Vertiefung der fachlichen Thematik und der Beschäftigung mit den Positionen der wissenschaftlichen Kontroverse verunsichert sind.

Tabelle 8.2: Massekonzepte der Befragten nach der Auseinandersetzung mit der wissenschaftlichen Kontroverse (Fragebogen 2)

	Lehrkräfte	Studierende
relativ	26	9
invariant	3	3
unentschieden	10	10
keine Angabe	4	0

8.2 Auseinandersetzung der Befragten mit einer wissenschaftlichen Kontroverse

8.2.1 Gedanken bei der Konfrontation mit einer wissenschaftlichen Kontroverse

In diesem Kapitel werden Ergebnisse in Verbindung mit dem Kategoriensystem *G* (Gedanken bei der Konfrontation mit einer wissenschaftlichen Kontroverse) dargestellt, das Erkenntnisse zu Forschungsfrage FF 1.1 abbildet. Dementsprechend wird erläutert, wie die befragten Physiklehrkräfte und Physiklehramtsstudierenden mit der wissenschaftlichen Kontroverse zur Relativität der Masse umgehen, wenn sie sich mithilfe der Textmaterialien zu entsprechenden Diskussionspunkten und Argumenten informieren können. Dabei werden die Daten auch im Hinblick auf Unterschiede zwischen den Lehrkräften und Studierenden hin analysiert (siehe FF 3). Für die Auswertung der Gedankenlisten konnten insgesamt alle 22 Studierenden und 39 Datensätze der Lehrkräfte einbezogen werden (siehe Anhang E.2, Tabelle E.10, S. 394). Die einzelnen Kategoriendefinitionen mit Codierregeln und Beispielen für das Kategoriensystem *G* sind dem Anhang B1 (S. 297) zu entnehmen und werden an dieser Stelle nicht im Detail vorgestellt. Abbildung 8.2 (S. 187) zeigt das vollständige Kategoriensystem *G* mit allen Unterkategorien.

Kategorienbasierte Auswertung

Wie Abbildung 8.3 (S. 188) zeigt, entfällt ein erheblicher Teil aller Codierungen auf die Kategorien *eigenes Verständnis/Wissen reflektieren oder einschätzen* (*G4*), *mit Aussagen/Argumenten auseinandersetzen* (*G5*), *zu Ansatz mit/ohne m(v) positionieren* (*G6*) und *Konsequenzen für den Unterricht ableiten* (*G7*), was im Wesentlichen für eine häufig tiefgründige, ernsthafte Auseinandersetzung der Befragten mit den Inhalten der Textmaterialien spricht. Dementsprechend besitzt auch die überwiegende Mehrheit aller Befragten jeweils mindestens eine Codierung in diesen Kategorien.

Die Konfrontation mit der wissenschaftlichen Kontroverse führt in vielen Fällen dazu, dass die Befragten ihr *eigenes Verständnis/Wissen reflektieren oder einschätzen* (*G4*). Dies kann einerseits bedeuten, dass die Befragten einfach das eigene Verständnis eines bestimmten Fachinhaltes darstellen (*G4.1*), wie beispielsweise S11B1:

> *mein Verständnis: Ruhemasse = Masse eines ruhenden Teilchens in einem Inertialsystem → Masse ist unveränderlich*

Darüber hinaus werden von den Befragten auch konkrete Verständnisprobleme und eigene Wissenslücken thematisiert (*G4.2*). Dabei spielt zum Teil auch eine Rolle, inwiefern Fachinhalte als neu empfunden werden (z. B. „*die Gleichung $F = \gamma^3 ma$ habe ich so noch nie gesehen*“, L30F5). Mitunter führt die Auseinandersetzung mit dem eigenen Vorwissens oder individuellen Verständnisschwierigkeiten auch zu spezifischen Fachfragen (z. B. „*Wenn sich bei ΔE in $mc^2 = E$ nicht die Masse ändert, so ist $c \neq c$ also müsste sich die Lichtgeschwindigkeit ändern?!*“, S21B2), deren Beantwortung für die Studienteilnehmenden wichtig sein könnte, um die persönliche Durchdringung der physikalischen Sachinhalte zu schärfen. Die Selbstreflexion kann

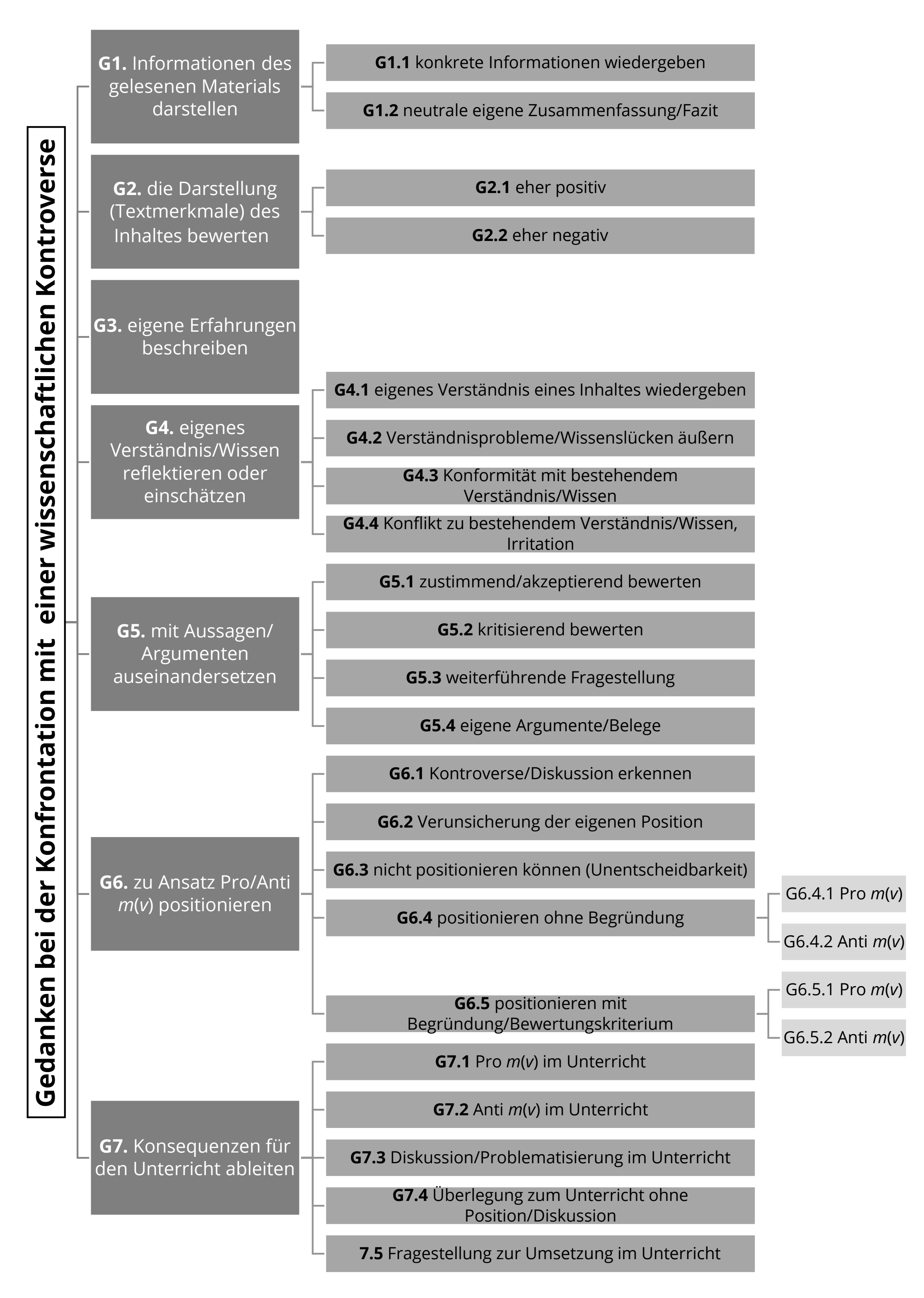


Abbildung 8.2: Kategoriensystem *G*: Gedanken bei der Konfrontation mit einer wissenschaftlichen Kontroverse

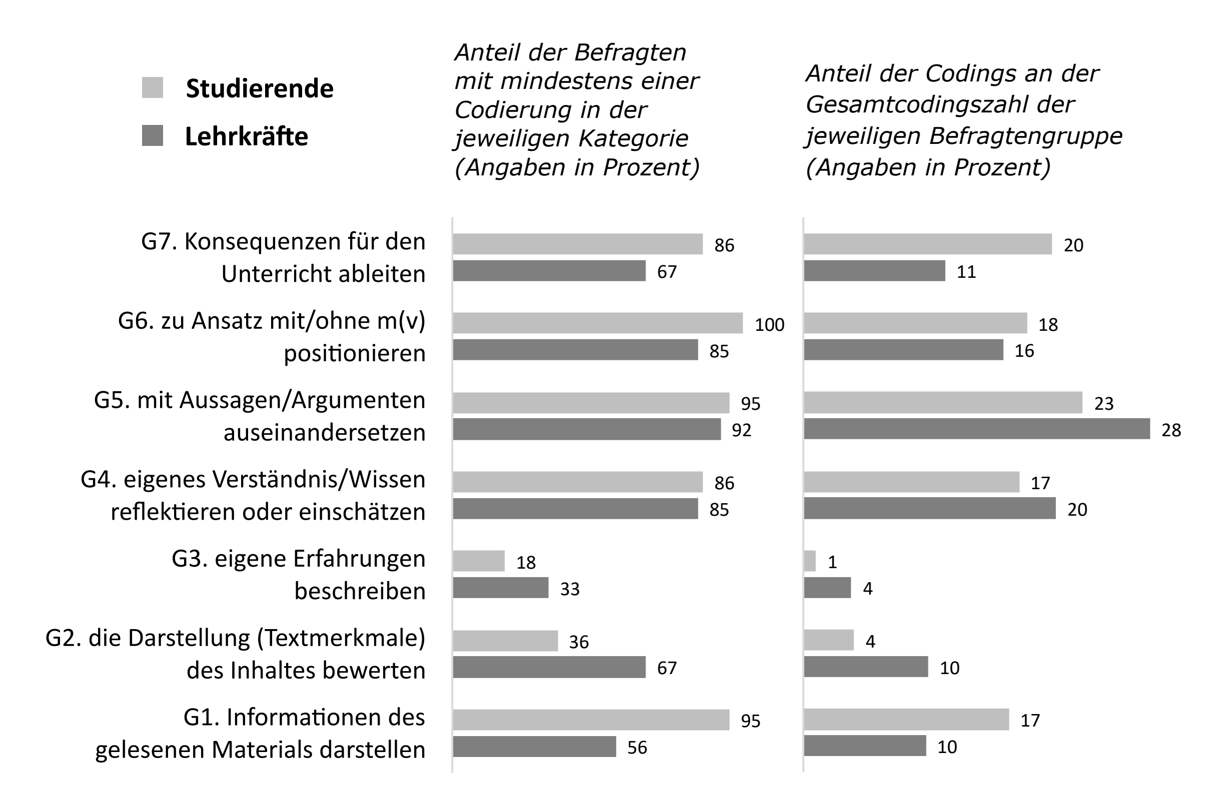


Abbildung 8.3: relative Häufigkeiten für das Kategoriensystem *G*

dabei durchaus selbstkritisch sein, wie das folgende Beispiel zeigt: „*sehr schnelle Ausprägung von Fehlvorstellungen → hab ich wahrscheinlich auch*“ (S11B1). Andererseits spiegeln die Gedankenlisten wider, dass ein beständiger Vergleichsprozess zwischen den dargebotenen Informationen in den Textmaterialien mit dem eigenen Verständnis, Vorwissen und Vorstellungen der Studienteilnehmenden stattzufinden scheint. Im Ergebnis eines solchen Abgleichs wird von den Befragten entweder ausgedrückt, dass bestimmte Inhalte zum eigenen Bild und Verständnisgebäude passen bzw. damit vereinbar sind (*G4.3*), zum Beispiel „*Es entspricht meiner Anschauung.*“ (L29F5), oder diesbezüglich ein Konflikt, eine Irritation besteht (*G4.4*). Im letzteren Fall wird teilweise schlicht Verwirrung ausgedrückt (z. B. „*jetzt bin ich verwirrt*“, L21F4) oder ein Widerspruch zwischen dem eigenen Verständnis und den rezipierten Informationen betont (z. B. „*entspricht nicht meinen Gedankengängen*“, L23F4).

Die insgesamt am häufigsten vergebene Kategorie (siehe Abbildung 8.3) ist *mit Aussagen/ Argumenten auseinandersetzen* (*G5*), was die oftmals aktive Beschäftigung der Studienteilnehmenden mit den Fachinhalten auf der Ebene der Argumente und Diskussionspunkte unterstreicht. Hierbei werden die in den Textmaterialien enthaltenen Argumentationsketten von den Befragten *zustimmend/akzeptierend* (*G5.1*) oder *kritisierend* (*G5.2*) bewertet. Für ersteren Fall zeigt sich das Einverstandensein mit den dargebotenen Aussagen und Argumenten anhand des Maßes an Zustimmung (z. B. „*bei d. Diskussion zu möglichen Fehlvorstellungen gehe ich mit*“, L15F3), der Beimessung von Relevanz (z. B. „*Der letzte Satz auf der Vorderseite ist der Schlüssel*“, L14F3) oder Überzeugungskraft (z. B. „*Text 2 (Photonen) überzeugt eher*

(aber man ist ja »geprägt«. . .)“, L26F4) sowie der Nachvollziehbarkeit der Logik der Argumente (z. B. „*Die mathematischen Argumente sind nachvollziehbar und logisch.*“, S1B1). Kritik wird auf der anderen Seite hinsichtlich der Gültigkeit von Aussagen, der vorgebrachten Belege oder Argumentationsstrukturen geübt (*G5.2*). Dies zeigt sich zum einen darin, dass die Befragten begründet widersprechen (Gegenargumente formulieren), wie S7B1:

> *meiner Meinung nach, verursacht es keine Widersprüche, man muss in ein anderes Bezugssystem gehen, um das plausibel erklären zu können*

oder Aussagen in Frage stellen, um Zweifel zu üben (z. B. „*Ist das nicht experimentell gesichert?*“, L26F4). Zum anderen werden die vorgefundenen Begründungen bzw. Belege ganz allgemein kritisiert: „*Klingt für mich nach wenig belegten Aussagen*“ (S10B1). Daneben bemängeln Studienteilnehmende die Genauigkeit von Aussagen (z. B. „*Jetzt wird der Begriff »Widerstand« eingeführt, aber die Eigenschaften dieses Begriffs bleiben unklar.*“, L43F6) oder zweifeln an deren Schlüssigkeit:

> *Gesamtenergie der Gasmenge und Masse der einzelnen Atome werden meiner Meinung nach kurzschlüssig aufeinander bezogen* (L14F3)

Indem die Befragten die Textinhalte, mit denen sie konfrontiert werden, aktiv durchdenken, ergeben sich zum Teil auch *weiterführende Fragen* (*G5.3*). Solche Fragestellungen lassen zumeist auch ein Interesse der Fragestellenden erkennen, Informationen oder Erklärungen zu erhalten, die nicht aus dem gelesenen Material gewonnen werden können, um Aussagen, Zusammenhänge oder Standpunkte besser nachvollziehen oder einordnen zu können (z. B. „*Aber welche Fehlvorstellungen werden bedient!?*“, S22B2). Dieses Interesse kann dabei auch ganz konkrete fachwissenschaftliche Gesichtspunkte (z. B. die Klärung des mathematischen Hintergrundes) adressieren, wie beispielsweise bei L26F4: „*Wo kommt denn Gl. (5) her?*“ Die Auseinandersetzung mit den Textinhalten reicht bis zur Formulierung *eigener Argumente/Belege* (*G5.4*) als Reaktion auf die gelesenen Inhalte. Die geäußerten Gedanken der Befragten gehen im Falle dieser Codierung insofern über die Textinhalte hinaus, als das von den Studienteilnehmenden selbst Argumente zur Be- bzw. Widerlegung von Aussagen vorgebracht werden, die inhaltlich nicht im Lesematerial enthalten sind. Ein passendes Beispiel hierfür stellt die folgende Bemerkung von L37F5 dar:

> *Meiner Meinung nach ist ein Verweis auf die relativistische Masse(zunahme) notwendig, um zu erklären, dass ein Elektron auch bei hohen Beschleunigungsspannungen nie schneller als c werden kann*

Solche eigenen Argumente finden sich häufiger bei den Lehrkräften als bei den Studierenden, was darauf zurückgeführt werden könnte, dass die Lehrkräfte zum Teil bereits über Unterrichtserfahrung zur Thematik der Relativitätstheorie verfügen. Die damit verbundene Unterrichtsvorbereitung erfordert eine Aufarbeitung und Systematisierung der Fachinhalte, die mit einem höheren themenspezifischem Fachwissens einher gehen könnte. Zusätzlich verfügen die Lehrkräfte möglicherweise über ein stärker vernetztes Überblickwissen in Bezug auf die physikalischen Sachinhalte der Oberstufe, mit dessen Hilfe sie Argumente generieren können, wie zum Beispiel:

> *ich bin Vertreter des pro-relativistischen-Masse-Standpunktes [...] in der Kernphysik werden dadurch Bindungsenergie aus dem Massedefekt und frei werdende Energien bei Kernspaltungsprozessen und Kernfusionsprozessen „begreifbar“ und berechenbar* (L24F4)

> *Die Unterscheidung zwischen Ruhemasse und bewegter Masse ist meines Erachtens richtig auch hinsichtlich der Quantenphysik die später behandelt wird.* (L30F5)

Andererseits ist auch denkbar, dass unter den Lehrkräften schlichtweg häufiger das Bestreben besteht, Gegenargumente zu finden, als es bei den Studierenden der Fall ist.

Eine wichtige Frage in der Auseinandersetzung mit einer wissenschaftlichen Kontroverse betrifft die eigene Positionierung im Hinblick auf die zugrundeliegende Problemstellung (*G6*). Hierbei reicht das Spektrum in den Gedankenlisten von *Verunsicherung der eigenen Position* (*G6.2*) und Unentschlossenheit (*G6.3*) bis zu einer klaren Positionierung mit (*G6.5*) oder ohne Begründung (*G6.4*). Dass die Befragten angeben, sich selbst nicht für eine Fachposition entscheiden zu können (*G6.3*), kommt nur selten vor. Die folgenden Codings verdeutlichen die Unentschlossenheit einiger Befragten (erstes Beispiel), aber auch die Anerkennung einer persönlich (Ich-Perspektive in den beiden zuletzt genannten Äußerungen) unentscheidbaren, nicht zu beurteilenden Situation:

> *Hin- und Hergerissen zwischen beiden Seiten (Pro- und Anti-Ansicht)* (S10B1)

> *Keine Entscheidung möglich (für mich) ob pro- oder contra Ansicht mehr Sinn macht* (S13B2)

> *ich fühle mich nicht in der Lage zu urteilen* (S12B2)

Des Weiteren werden von einem Teil der Befragten Zweifel oder Verunsicherung hinsichtlich der eigenen Position signalisiert (z. B. „*Nun stelle ich alles in Frage und bin maximal verunsichert*“, S12B2). Auf der anderen Seite gibt es Studienteilnehmende, die einen eindeutigen Standpunkt (*G6.4* und *G6.5*) im Hinblick auf die beiden Entscheidungsoptionen einnehmen, wie die Aussage von S22B2 illustriert: „*Für mich gehört die Relativität der Masse auch zum Kern der speziellen Relativitätstheorie*“. Zusätzlich machen einige Befragte ihre Wahrnehmung einer Kontroverse (*G6.1*), in der unterschiedliche Positionen diskutiert werden können, explizit:

> *Fazit aus den letzten Texten: große Meinungsverschiedenheit über relativistische Masse* (S10B1)

> *Es sind offensichtlich viele Deutungen bzgl. der Experimente möglich, aber auch nötig, um keinen wissenschaftlichen Ansatz zu vergessen* (L29F5)

Da die Auseinandersetzung mit der wissenschaftlichen Kontroverse für die Befragten auch mit der fachdidaktischen Frage nach der Darstellung des betreffenden Sachinhalts im Physikunterricht verknüpft ist, werden in den Gedankenlisten auch *Konsequenzen für den Unterricht abgeleitet* (*G7*). Die entsprechenden Codierungen sind etwas häufiger bei den Lehramtsstudierenden (siehe Abbildung 8.3, S. 188), wobei die Ursache hierfür unklar ist. Ein Teil der

Befragten entscheidet sich dabei konkret für eine der beiden Möglichkeiten (Ansatz 1 oder 2) bei der Behandlung der Thematik im Unterricht. L9F2 gibt beispielsweise an: „*Pro-Ansicht macht für die Einführung im Unterricht Sinn*“, und spricht sich damit für Ansatz 1 auch im Unterricht aus (*G7.1*). Deutlich seltener äußern sich Befragte dahingehend, Ansatz 2 (Anti relativistische Masse) im Unterricht nutzen zu wollen (*G7.2*):

> *Lehrperson sollte Lehrbuch prüfen und die überholten Stellen auslassen; der den SuS klar machen das es falsch/überholt ist; Verwendung der relativistischen Gleichung für* $p = m\gamma v$ *statt* $p = mv$ *damit m nicht* $m\gamma$ *ersetzen muss, was sonst wieder bewegte Masse (was überholt ist) wäre.* (S1B1)

Ein anderer Teil der Befragten zeigt sich im Gegenteil dazu unentschieden und drückt mit einer *Fragestellung zur Umsetzung im Unterricht* (*G7.5*) auch Unsicherheit bezüglich dieser fachdidaktischen Entscheidung aus:

> *weiterführende Fragestellung: Wie in eigenen Unterricht darstellen/vermitteln?* (S11B1)

> *Was wäre jetzt „besser“, verständlicher für Schüler?* (L43F6)

Aber auch ein multiperspektivischer Zugang ist für einige Studienteilnehmende denkbar. Dabei wird teilweise auf eine Diskussion der Problematik der beiden unterschiedlichen Ansätze im Unterricht abgezielt oder zumindest prinzipiell die Möglichkeit hierzu erwogen (*G7.3*): „*Es wäre aber definitiv zu überlegen, dieses Thema als Diskussionsgrundlage zu nutzen*“ (S9B1). Auch eine grundsätzliche Offenheit für solche Diskussionsgelegenheiten (z. B. „*Allerdings sollte man einer Diskussion offen gegenüber stehen.*“, L29F5) oder die Bereitschaft, auf die Problematik der kontroversen Positionen hinzuweisen, kann in den Gedankenlisten gefunden werden:

> *Sollte man an dieser Stelle den SuS mitteilen, dass die aktuelle Forschung dahingehend noch nicht abgeschlossen ist und das es an diesem Punkt noch keine endgültige Entscheidung über richtig und falsch gibt.* (S1B1)

Darüber hinaus äußern die Befragten weitere Überlegungen zur Gestaltung des Unterrichts (*G7.4*). Im Hinblick auf den Umgang mit wissenschaftlichen Kontroversen sollen darunter zwei Punkte hervorgehoben werden: Zum einen wird von einigen wenigen Befragten angegeben, dass man als Lehrkraft selbst einen eindeutigen Standpunkt einnehmen sollte:

> *vorher konkreten Standpunkt darlegen, wie eigene Position ist und diesen konsequent umsetzen* (L10F2)

> *auch sollte man sich als Physiklehrer zu dem Begriff der relativistischen Masse eine Meinung bilden und diese vertreten* (S16B2)

Bei dieser Haltung wird bewusst auf einen neutralen Standpunkt der Lehrkraft verzichtet. Diese Ansicht könnte unter Umständen auch darin begründet liegen, dass angenommen wird, die Lernenden könnten mit Kontroversität überfordert sein, wie das folgende Zitat zeigt:

> *Lehrer sollte nur Standpunkte unterrichten, die er selbst begründet vertritt?! → erscheint in diesem Fall schwierig*
> *→ Unsicherheit darüber, ob man SuS mit diesen konträren Standpunkten konfrontieren sollte*
> *→ Mehr Verwirrung könnte dazu führen, dass sie sich im Nachhinein an keinen von beiden Ansätzen erinnern können, geschweige denn einen zur Erklärung der relativistischen Phänomene heranziehen können.*
> *→ Nachhaltigkeit der Wissensvermittlung für SuS sollte m. A. n. unbedingt gegeben sein! (Schüler sitzen zuhause abends am Essenstisch und will seinen Eltern erklären, was er heute gelernt hat…)* (S5B1)

Ein zweiter Gesichtspunkt, der in den Gedankenlisten thematisiert wird, ist die Idee eines möglichst einheitlichen Vorgehens bei der Vermittlung des Lerninhalts:

> *evtl. sollte man als Fachlehrer einer Meinung sein, bzw. alle Physiklehrer einer Schule sollten sich absprechen, um Missverständnissen bei einem Lehrerwechsel vorzubeugen* (S16B2)

> *es müsste einheitlich geklärt werden, wie es in Schulen und an Universitäten gelehrt werden soll!* (S8B1)

Im zweiten Coding wird dabei sogar eine Forderung nach Vereinheitlichung verbalisiert, die in einem gewissen Kontrast zu einer multiperspektivischen Wissensvermittlung bzw. letztlich auch zu einem angemessenen Wissenschaftsverständnis steht.

Prinzipiell seltener als bei den oben beleuchteten Kategorien erfolgten Codierungen in den Bereichen *Informationen des gelesenen Materials darstellen* (*G1*), *die Darstellung (Textmerkmale) des Inhaltes bewerten* (*G2*) und *eigene Erfahrungen beschreiben* (*G3*) (siehe Abbildung 8.3, S. 188). Die Codierungen in Kategorie *G1* geben Hinweise darauf, wie sich die Studienteilnehmenden die Inhalte der gelesenen Texte, mit denen sie konfrontiert werden, erschließen und welche Informationen ihnen dabei wichtig erscheinen. So werden Informationen aus den gelesenen Materialien einerseits einfach reproduziert (*G1.1*, z. B. „*Formel* $F = \gamma^3 ma$“, L9F2) oder andererseits wertneutral mit eigenen Worten zusammengefasst bzw. ein Fazit formuliert (*G1.2*): „*Nach der hier dargebotenen Argumentation gibt es auch Vorteile der prorelativistischen Masse-Auffassung*“ (S22B2). Auffällig ist dabei, dass fast alle Studierenden und nur etwa die Hälfte der Lehrkräfte Codierungen in der Kategorie *G1* besitzen (siehe Abbildung 8.3, S. 188). Dies könnte dahingehend interpretiert werden, dass die Lehramtsstudierenden durch den Alltag ihres Studiums im Sinne einer Lernstrategie gewohnt sind, Informationen aus Texten für sich selbst zusammenzufassen. Codierungen aus diesem Bereich vermitteln zunächst den Eindruck, einer eher neutralen Auseinandersetzung mit den Inhalten der Textmaterialien.

Ein umgekehrtes Verhältnis zeichnet sich bei Codierungen im Bereich *die Darstellung (Textmerkmale) des Inhaltes bewerten* (*G2*) ab. Hierbei wird die Darstellung von Inhalten hinsichtlich oberflächlicher bzw. globaler Textmerkmale, wie Textverständlichkeit, Anschaulichkeit oder inhaltliche Klarheit und Genauigkeit auch bezüglich der „Unterrichts- bzw. Schülergeeignetheit“ eingeschätzt. Diese Kategorie wurde weniger häufig bei den Studierenden im Vergleich zu den Lehrkräften codiert (siehe Abbildung 8.3, S. 188). Da die entsprechenden Codings vor allem in

den Gedankenauflistungen zu Textmaterial 1 (Unterrichtsmaterialien) vorkommen, erscheint es wahrscheinlich, dass die entsprechenden Lehrkräfte die Textinhalte im Hinblick auf deren Eignung zum Einsatz im Unterricht bewerten, wie die folgenden Beispiele zeigen:

> *Text für Verwendung im Unterricht ungeeignet (aus meiner Sicht)* (L30F5)

> *Zum Diagramm:*
>
> - *für Schüler sind absolute Masseangaben leichter zu erfassen als relative Angaben*
> - *die Einteilung der Achse für das Vielfach der Lichtgeschwindigkeit ist ungünstig eingeteilt, da bei einer Erhöhung um 0,2 eine Einteilung in 3 Schritten erfolgt* (L31F5)

> *Text 1 leicht verständlich, aufgelockert durch Diagramm u. Gleichung, übersichtlicher* (L16F3)

Die insgesamt wenigsten Codierungen finden sich in der Kategorie *eigene Erfahrungen beschreiben* (*G3*) (siehe Abbildung 8.3, S. 188). Lehrkräfte reflektieren dabei ihren bisherigen Unterricht (z. B. „*Anti-Ansicht bei mir eigentlich gar kein Thema (im UR)*", L23F4), während Studierende eigene Lernerfahrungen nennen (z. B. „*wir haben in der Vorlesung KeT durchaus mit dynamischen Massen gerechnet...*", S10B1).

Unterschiede zwischen Lehrkräften und Studierenden

Die Analyse der Gedankenlisten deutet insgesamt betrachtet auf zwei wesentliche Unterschiede zwischen den Lehrkräften und Studierenden hin:

1. Es zeigt sich ein größerer Teil der Studierenden offen gegenüber den verschiedenen kontroversen Fachpositionen (Ansatz 1 und 2), als es bei den Lehrkräften der Fall ist.
2. Im Vergleich zu den Studierenden scheint ein größerer Teil der Lehrkräfte eine gefestigte eigene Fachposition zu besitzen.

Im Folgenden werden empirischen Hinweise vorgestellt, welche die Grundlage dieser Einschätzung bilden.

Begründung des ersten Unterschiedes zwischen Lehrkräften und Studierenden:

Für eine Begründung des ersten Unterschiedes kann unter anderem betrachtet werden, wie die Befragten auf diejenigen Textmaterialien reagieren, in denen Ansatz 2 (Anti $m(v)$) vertreten wird. Da der überwiegende Teil der Befragten im Vorfeld der Auseinandersetzung mit der wissenschaftlichen Kontroverse dem Massekonzept gemäß Ansatz 1 (Pro $m(v)$) zugeordnet wurde (siehe Kapitel 8.1, S. 183), ist deren Umgang mit den hierzu konträren Informationen in den Textmaterialien Nummer 1, 3 und 5 besonders interessant. Betrachtet man die beiden Kategorien *G4.3 Konformität mit bestehendem Verständnis/Wissen* und *G5.1 zustimmend/akzeptierend bewerten*, fällt auf, dass in Bezug zu dem Teil des Textmaterials 1, in dem Ansatz 2 dargestellt wird, mehr als ein Viertel der Studierenden Codierungen besitzt, während bei keinem

der Lehrkräfte entsprechende Codierungen vorliegen. Bei Textmaterial 3 trifft dies für fast ein Drittel der Studierenden zu, allerdings nur für zwei Lehrkräfte (etwa 5%). Insbesondere zu Textmaterial 1 zeigt sich, dass nur wenige Studierende *die Darstellung (Textmerkmale) des Inhaltes bewerten* (*G2*), demgegenüber ein nicht zu vernachlässigender Teil der Lehrkräfte steht (siehe Tabelle 8.3). Diese reagieren vor allem positiv (*G2.1*) auf den ersten Teil des Materials zu Ansatz 1 (Pro $m(v)$) und ein Drittel äußert sich negativ (*G2.2*) bezüglich des zweiten Teils zu Ansatz 2 (Anti $m(v)$). Bei den Studierenden zeichnet sich diese Tendenz einer negativen Beurteilung des Unterrichtsmaterials zu Ansatz 2 (Anti $m(v)$) nicht ab.

Tabelle 8.3: Reaktionen auf Textmaterial Nr. 1

	1. Teil des Materials **Pro m(v)**		2. Teil des Materials **Anti m(v)**	
	Lehrkräfte	Studierende	Lehrkräfte	Studierende
G2.1 eher positiv	19 (49%)	4 (18%)	0	1 (5%)
G2.2 eher negativ	0	2 (9%)	13 (33%)	1 (5%)
G2.1 und *G2.2*	3 (7%)	2 (9%)	0	1 (5%)

Die Untersuchung der Codierungen zu denjenigen Kategorien, die eine Positionierung der Befragten abbilden (*G6.4*, *G6.5*, *G7.1* und *G7.2*), zeigt für die Textmaterialien 3 und 5, dass die Lehrkräfte nahezu ausschließlich die Gegenposition (Pro $m(v)$) zum Textinhalt verbalisieren (siehe Abbildung 8.4, S. 195). Bei den Studierenden ergibt sich ein eher ausgeglichenes Bild. Das heißt, unter den Studierenden findet man im Vergleich zu den Lehrkräften häufiger zustimmende, Konformität zum Inhalt ausdrückende Äußerungen bezüglich des sicherlich meistens unbekannten Ansatzes 2 (Anti $m(v)$). Die entsprechenden Informationen zu diesem Ansatz provozieren bei den Lehrkräften jedoch in mehr Fällen als bei den Studierenden eine negative Bewertung des Textes sowie eine Positionierung „gegen den Textinhalt".

Zwei weitere Hinweise, die für eine vermehrte Offenheit unter den Studierenden im Vergleich zu den Lehrkräften sprechen, liefert eine Analyse der Kategorien *G6.1 Kontroverse/Diskussion erkennen* und *G7.3 Diskussion/Problematisierung im Unterricht*. Dabei zeigt sich, dass der relative Anteil an Lehramtsstudierenden mit mindestens einer Codierung in diesen Kategorien gegenüber dem der Lehrkräfte deutlich erhöht ist (siehe Abbildung 8.5, S. 196). Demnach bringen die Studierenden eher Offenheit zum Ausdruck, die vorgefundenen widersprüchlichen Informationen in ihrer Kontroversität wahrzunehmen bzw. zu akzeptieren und zeigen etwas häufiger die Bereitschaft für eine Problematisierung der beiden kontroversen Fachpositionen im Unterricht. Diesen Befund unterstreicht auch der folgende Gedanke einer Studentin:

> *Aufgrund dieser beiden Ansichten empfinde ich es als sinnvoll & notwendig beide Standpunkte mit den Schüler*innen zu diskutieren und dazu auch „Fachliteratur" zu Rate zu ziehen.* (S21B2)

Bei den Lehrkräften können im Gegensatz dazu Codings vorgefunden werden, die eine deutlich eingeschränktere Diskussionsbereitschaft widerspiegeln, wie zum Beipsiel: „*Bei Nachfragen Hinweis auf Diskussion Pro/Anti*" (L16F3).

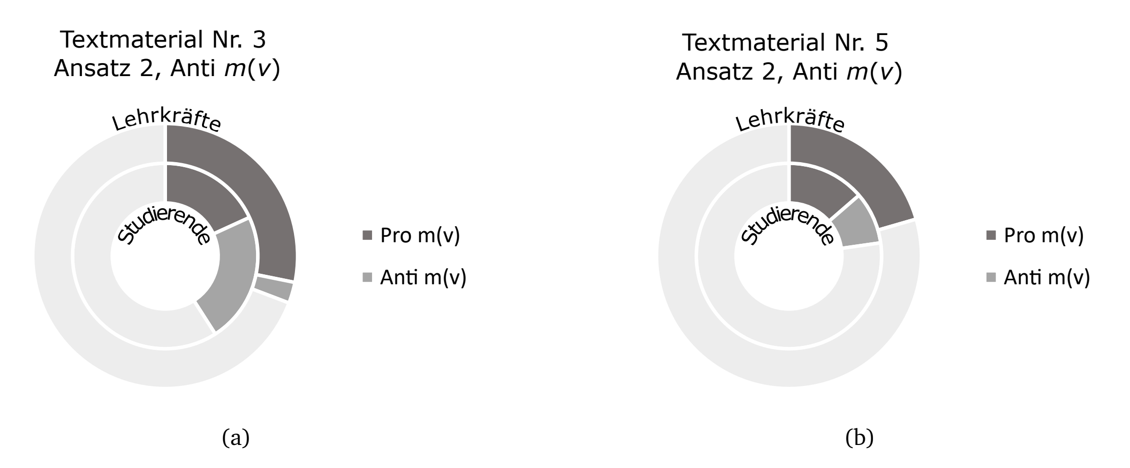


Abbildung 8.4: (a) Anteil der Befragten (außen: Lehrkräfte, $N = 39$ | innen: Studierende, $N = 22$), die sich in der Gedankenauflistung zu Textmaterial Nr. 3 Pro $m(v)$ bzw. Anti $m(v)$ positionieren
(b) Anteil der Befragten (außen: Lehrkräfte, $N = 39$ | innen: Studierende, $N = 22$), die sich in der Gedankenauflistung zu Textmaterial Nr. 5 Pro $m(v)$ bzw. Anti $m(v)$ positionieren

Begründung des zweiten Unterschiedes zwischen Lehrkräften und Studierenden:

Dass die Studierenden häufiger eine weniger gefestigte eigene Fachposition als die Lehrkräfte besitzen, soll mithilfe der beiden folgenden Anhaltspunkte belegt werden. Zum einen kann anhand der Kategorien *G6.4*, *G6.5*, *G7.1* und *G7.2* sowie der Daten der Fragebogen 1 und 2 die Positionierung der Befragten zu den beiden Massekonzepten nachvollzogen werden. Die Analyse des Vorkommens dieser Kategorien sowie die Auswertung der Antworten in den Fragebogen erlaubt es, die Fachposition der Befragten im zeitlichen Verlauf zu untersuchen. Dabei stellt sich heraus, dass unter den Studierenden der relative Anteil derjenigen, die ihre Position mindestens einmal wechseln, höher ist, als unter den Lehrkräften (siehe Abbildung 8.6a, S. 197). Bei den Lehrkräften können maximal L16F3 und L21F4 zu den Befragten gerechnet werden, die ihre Fachposition verändern, wobei dies nur unter Berücksichtigung des Ergebnisses aus Fragebogen 1 zutreffend ist. Für die Studierenden trifft das auf S3B1 und S10B1 zu. Darüber hinaus zeugen gerade die folgenden Gedanken von S2B1, S15B2 und S22B2 für eine klare Veränderung der eigenen fachlichen Überzeugung:

S2B1:

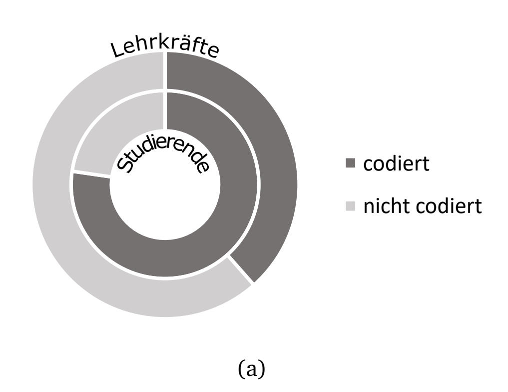
zu Material 3: „*Masse ist aber invariant (denke ich)*“

zu Material 4: „*Das Photon überzeugt mich, dass es relativistische Masse gibt*“

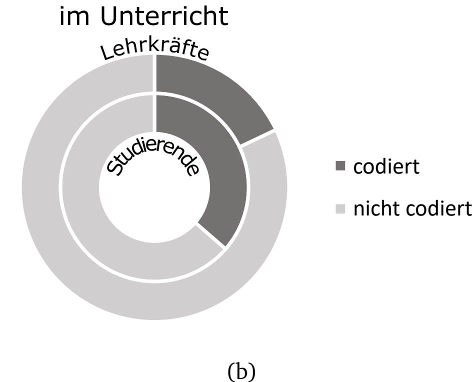
S15B2:

zu Material 2: „*für mich sinnvoller und notwendig Relativität der Masse zu lehren*“

zu Material 5: „*Konzept der relativist. Masse sollte verworfen werden*“



(a)



(b)

Abbildung 8.5: (a) Anteil der Befragten (außen: Lehrkräfte, $N = 39$ | innen: Studierende, $N = 22$) mit mindestens einer Codierung in der Kategorie *G6.1 Kontroverse/Diskussion erkennen*
(b) Anteil der Befragten (außen: Lehrkräfte, $N = 39$ | innen: Studierende, $N = 22$) mit mindestens einer Codierung in der Kategorie *G7.3 Diskussion/Problematisierung im Unterricht*

S22B2:

zu Material 2: *„Für mich gehört die Relativität der Masse auch zum Kern der speziellen Relativitätstheorie.“*

zu Material 5: *„Auch diese Quellen bestärken mich, die anti-relativistische Masse-Auffassung zu vertreten.“*

Der Anteil von „Positionswechselnden“ unter den Studierenden deutet einerseits daraufhin, dass häufiger als bei den Lehrkräften noch flexible bzw. weniger stabilisierte Fachpositionen bestehen und andererseits ist daran wiederum Offenheit gegenüber anderen, gegensätzlichen fachwissenschaftlichen Standpunkten erkennbar. Dieses Bild scheint prinzipiell auch konsistent zum Antwortverhalten im Fragebogen 2 (Item 1) zu sein, in dem im Nachgang an die Gedankenauflistung die Fachposition der Studienteilnehmenden erhoben wurde. Auch hier zeigten sich unter den Studierenden mehr Unentschiedene als bei den Lehrkräften (siehe Kapitel 8.1, Abbildung 8.1b, S. 185). Dazu passt das Beispiel der Studentin S9B1, die aufgrund der gelesenen Textmaterialien zunächst von Ansatz 2 überzeugt scheint, dann Vorteile des Ansatzes 1 hervorhebt und im Fragebogen 2 schließlich mit „unentschieden“ auf die Frage nach der Relativität der Masse antwortet.

Als zweiter Gesichtspunkt kann die Verunsicherung der Studienteilnehmenden im Hinblick auf ihre Fachposition betrachtet werden. Zur Beurteilung dessen werden die Kategorien *G6.2*, *G6.3* und *G7.5* herangezogen, wobei nur diejenigen Codings der Kategorie *G7.5* beachtet wurden, aus denen eine Frage zur Positionierung bei der Umsetzung des Themas im Unterricht hervorgeht, wie zum Beispiel:

Positionierung Pro/Anti $m(v)$

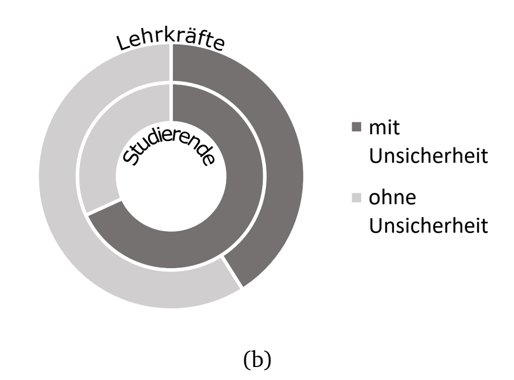
Lehrkräfte

Studierende

mit Wechsel

ohne Wechsel

(a)



(b)

Abbildung 8.6: (a) Anteil der Befragten (außen: Lehrkräfte, $N = 39$ | innen: Studierende, $N = 22$), die ihre Fachposition im Verlauf der Auseinandersetzung mit der wissenschaftlichen Kontroverse wechseln
(b) Anteil der Befragten (außen: Lehrkräfte, $N = 39$ | innen: Studierende, $N = 22$), die mindestens einmal Unsicherheit bezüglich der eigenen Fachposition äußern

> *Stellt sich mir letztendlich die Frage, welches Konzept besser geeignet ist, einen Schüler (keinen Studenten) an das Thema heranzuführen.* (L1F1)

> *FRAGE: Nach dem Lesen dieser Texte frage ich mich aktuell: Führe ich die bewegte Masse nun ein oder nicht???* (S8B1)

Abbildung 8.6b verdeutlicht, dass der relative Anteil der Studierenden, die mindestens einmal Unsicherheit bezüglich der eigenen Fachposition während des Lesens der verschiedenen Textmaterialien zeigen, größer ist als bei den Lehrkräften. Studierende lassen sich demnach vermutlich eher verunsichern, was den eigenen fachwissenschaftlichen Standpunkt betrifft, was dafür spricht, dass die eigene Fachposition im Vergleich zu den Lehrkräften weniger gefestigt ist.

Aufgrund der oben ausgeführten Analyseschritte liegt die Vermutung nahe, dass bei Physiklehramtsstudierenden möglicherweise eher (höhere Wahrscheinlichkeit) mit einer offenen Haltung gegenüber unterschiedlichen, kontroversen fachwissenschaftlichen Positionen und mit einer tendenziell weniger gefestigten eigenen Fachposition gerechnet werden kann, als es bei Physiklehrkräften der Fall sein könnte.

8.2.2 Bewertungskriterien

Im vorliegenden Kapitel werden Ergebnisse im Zusammenhang mit dem Kategoriensystem *B* (Bewertungskriterien) beschrieben, das zur Untersuchung der Forschungsfrage FF 1.2 gebildet wurde. Die Bewertungskriterien, die von den befragten Physiklehrkräfte und Physiklehramts-

studierenden im Prozess der Entscheidung über die Art der Darstellung der wissenschaftlichen Kontroverse zur Relativität der Masse im Physikunterricht genutzt werden, sollen an dieser Stelle erläutert werden. In die Auswertung wurden die Datensätze aller 22 Studierenden und die von 39 Lehrkräften einbezogen (siehe Anhang E.2, Tabelle E.10, S. 394). Alle Kategoriendefinitionen sowie die Codierregeln und Beispiele für das Kategoriensystem *B* sind dem Anhang B2 (S. 315) zu entnehmen und werden an dieser Stelle nicht im Detail vorgestellt. In Abbildung 8.7 (S. 199) wird das Kategoriensystem *B* mit allen Unterkategorien vollständig dargestellt.

Kategorienbasierte Auswertung

Es zeigt sich, dass für die Befragten insgesamt betrachtet eine Vielzahl verschiedener Bewertungskriterien während des Entscheidungsprozesses eine Rolle spielen können. Die möglicherweise bedeutsamsten unter diesen Kriterien sind *B2 Unterrichts-/Schülertauglichkeit* und *B4.1 fachliche Richtigkeit*, die jeweils von etwa der Hälfte der Lehrkräfte und Studierenden genannt werden (siehe Abbildung 8.8, S. 201). Ein erheblicher Teil der Befragten beurteilt die beiden unterschiedlichen Ansätze 1 und 2 also danach, inwiefern sich diese zum Einsatz im Unterricht bzw. der Arbeit mit Schülern eignen (z. B. „*Pro-Ansicht macht für die Einführung im Unterricht Sinn*“, L9F2) und ob sie der eigenen Einschätzung nach physikalisch oder mathematisch korrekt sind (z. B. „*Vorausgesetzt, alle math. Umformungen sind korrekt*“, L37F5). Die Relevanz dieser Bewertungskriterien für (zukünftige) Physiklehrkräfte ist im Hinblick auf deren Rolle als „Vermittler von Sachinhalten“ auch zu erwarten.

Womöglich nicht völlig losgelöst von dem Kriterium der *Unterrichts-/Schülertauglichkeit* (*B2*) sind die *Kriterien zur Verständlichkeit* (*B1*) zu sehen. Insbesondere für die Studierenden gehört die *Plausibilität (Verständlichkeit, Nachvollziehbarkeit)* (*B1.1*), also die Frage, ob ein Ansatz oder ein Argument einleuchtend, verständlich und begreiflich erscheint, mit zu den am häufigsten vorkommenden Codierungen. Zusätzlich relevant kann dabei das jeweilige Maß an *Einfachheit* (*B1.2*) sein: Wie einfach oder schwer ist das Verständnis des Ansatzes oder Arguments? Ein weiteres Kriterium zur Verständlichkeit stellt die Beurteilung der verschiedenen Positionen oder Argumente der wissenschaftlichen Kontroverse hinsichtlich ihrer *Klarheit* (*B1.3*) dar (z. B. „*sehr unklar (Bedeutung der Begriffe)*“, L14F3). Die Bewertungskriterien zur Verständlichkeit kommen dabei auch unabhängig von Aspekten der Darstellung im Unterricht für Schüler vor, was zeigt, dass die Kriterien auch auf der Ebene des individuellen, persönlichen Verständnisses verortet sind.

Spezifisch für die Auseinandersetzung mit einer wissenschaftlichen Kontroverse im Bereich der Physik sind sicherlich die *speziellen Kriterien der Naturwissenschaft (Physik)* (*B4*), die von den Befragten genutzt werden. Neben der *fachlichen Richtigkeit* (*B4.1*) zählt hierzu unter anderem, inwieweit ein Ansatz oder ein Argument durch Beobachtungen oder Ergebnissen von Experimenten nachgewiesen werden kann bzw. mit diesen vereinbar ist:

> *Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse ist experimentell erwiesen* (L26F4)
>
> *Wie will man diese Theorie komplett ablehnen, wenn sie doch für viele Beobachtungen konsistent ist?* (S12B2)

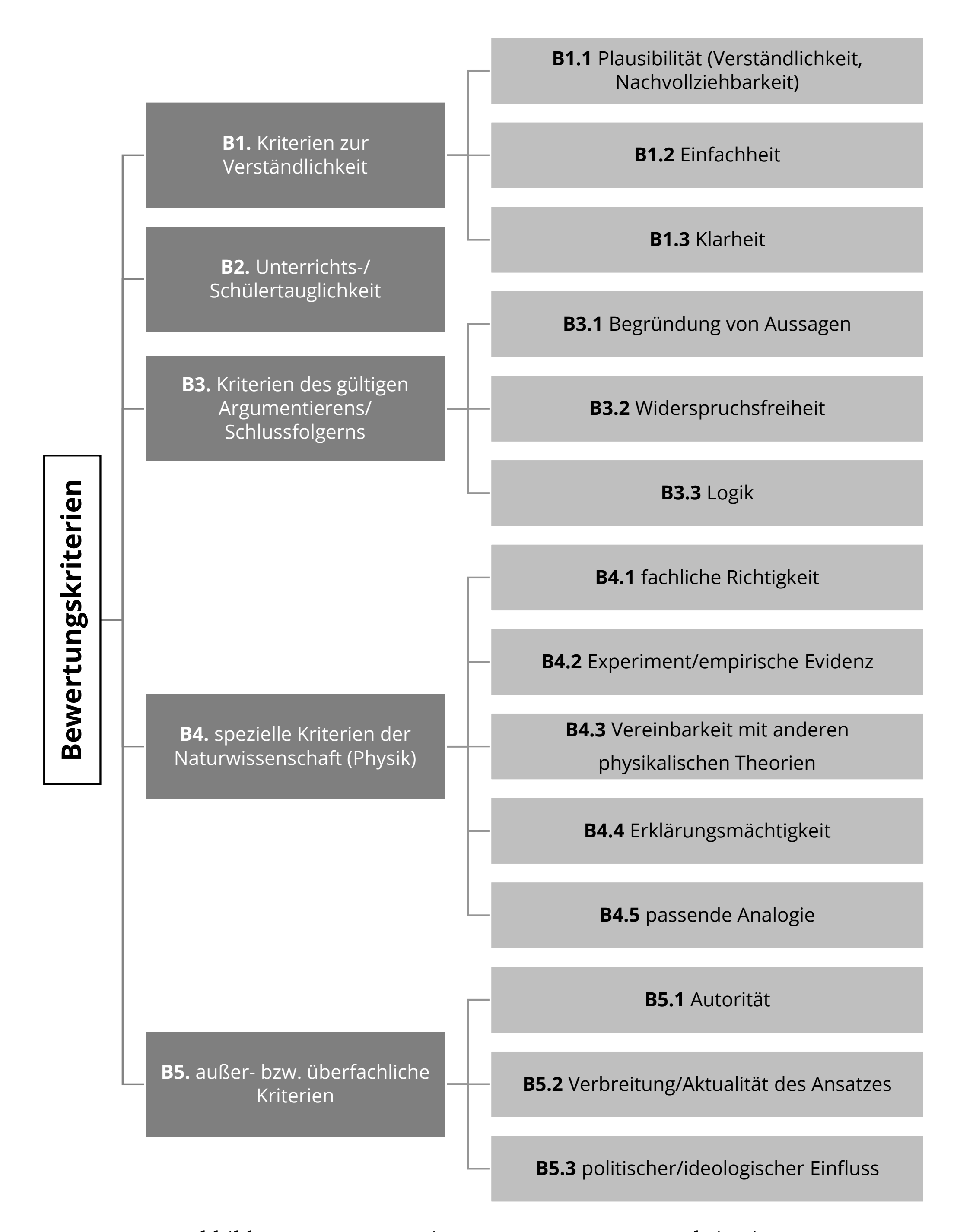


Abbildung 8.7: Kategoriensystem *B*: Bewertungskriterien

Insbesondere von Studierenden wird das Kriterium der empirischen Evidenz häufig herangezogen (siehe Abbildung 8.8, S. 201). Gerade im Umgang mit wissenschaftlichen Kontroversen ist damit auch ein wichtiger Aspekt naturwissenschaftlicher Denk- und Arbeitsweisen verbunden. Weitere typische naturwissenschaftliche Bewertungskriterien sind die *Vereinbarkeit mit anderen physikalischen Theorien* (*B4.3*) (Inwiefern ist ein Sachverhalt mit anderen physikalischen Theorien vereinbar, konsistent?) sowie die Erklärungskraft eines physikalischen Ansatzes (*B4.4*), wie im Beispiel von L37F5:

> *Meiner Meinung nach ist ein Verweis auf die relativistische Masse(zunahme) notwendig, um zu erklären, dass ein Elektron auch bei hohen Beschleunigungsspannungen nie schneller als c werden kann*

Nicht zu vernachlässigen ist die Bedeutung von Analogiebetrachtungen (*B4.5*) für die Befragten. Vor allem in Verbindung mit Textmaterial Nummer 6, in dem analog zur Relativität der Zeit für die Relativität der Masse argumentiert wird, stellen die Studienteilnehmenden dahingehende Überlegungen an:

> *Nachdem die Zeitdilatation u. die Längenkontraktion mit dem Lorentzfaktor erklärt wurde, würde ich in meinem Unterricht die Masse ebenso erklären.* (L29F5)

Dabei sollten solche Analogieschlüsse jedoch teilweise kritischer in Bezug auf die vermeintliche Analogie analysiert werden.

Neben solchen eher „innerfachlichen“ Bewertungskriterien werden von den Befragten auch *außer- bzw. überfachliche Kriterien* (*B5*) genannt. So wird unter anderem die (z. B. wissenschaftliche oder rechtliche) *Autorität* (*B5.1*) einer Person oder Institution in den Beurteilungsprozess einbezogen: Inwiefern wird ein Ansatz oder ein Argument zum Beispiel von einem bestimmten Wissenschaftler vertreten (z. B. „*Einstein als Genie will ich eigentlich schon glauben*“, S10B1) oder ist institutionell verankert, beispielsweise im Lehrplan („*Als Lehrer richte ich mich nach dem Lehrplan und den gängigen Lehrwerken.*“, L29F5)? Eine ebenfalls wichtige orientierende Funktion könnten für die Befragten auch Informationen zur *Verbreitung/Aktualität des Ansatzes* (*B5.2*) in der Fachliteratur bzw. -gemeinschaft haben: „*Begriff »Ruhemasse« ist aber so verbreitet, dass er vielleicht doch erwähnt werden sollte*“ (S6B2). Dieses Kriterium kommt im Vergleich zu den Lehrkräften bei einem größeren relativen Anteil der Studierenden vor. Von wahrscheinlich nachrangiger Bedeutung für die hier betrachtete wissenschaftliche Kontroverse ist das Kriterium *politischer/ideologischer Einfluss* (*B5.3*), welches konkret nur in Verbindung mit Textmaterial 2 vorkommt. Darin enthalten ist eine Information des türkischen Lehrplans (Auswahl aufgrund der Authentizität dieser Information) zur Frage der Relativität der Masse, was bei einigen der befragten Lehrkräfte zu der Vermutung führt, dass möglicherweise auch politische oder ideologische Interessen Einfluss auf die wissenschaftliche Streitfrage nehmen:

> *türkischer Lehrplan anti-aufklärerisch nach dem Motto: „Ich glaube nur, was ich unmittelbar wahrnehme. Alles andere ist Unsinn.“* (L14F3)

> *Man kann es sich auch leicht machen und die Leute für dumm verkaufen. Insbesondere, wenn für ein polit. System ungebildete Menschen „pflegeleichter“ sind.* (L26F4)

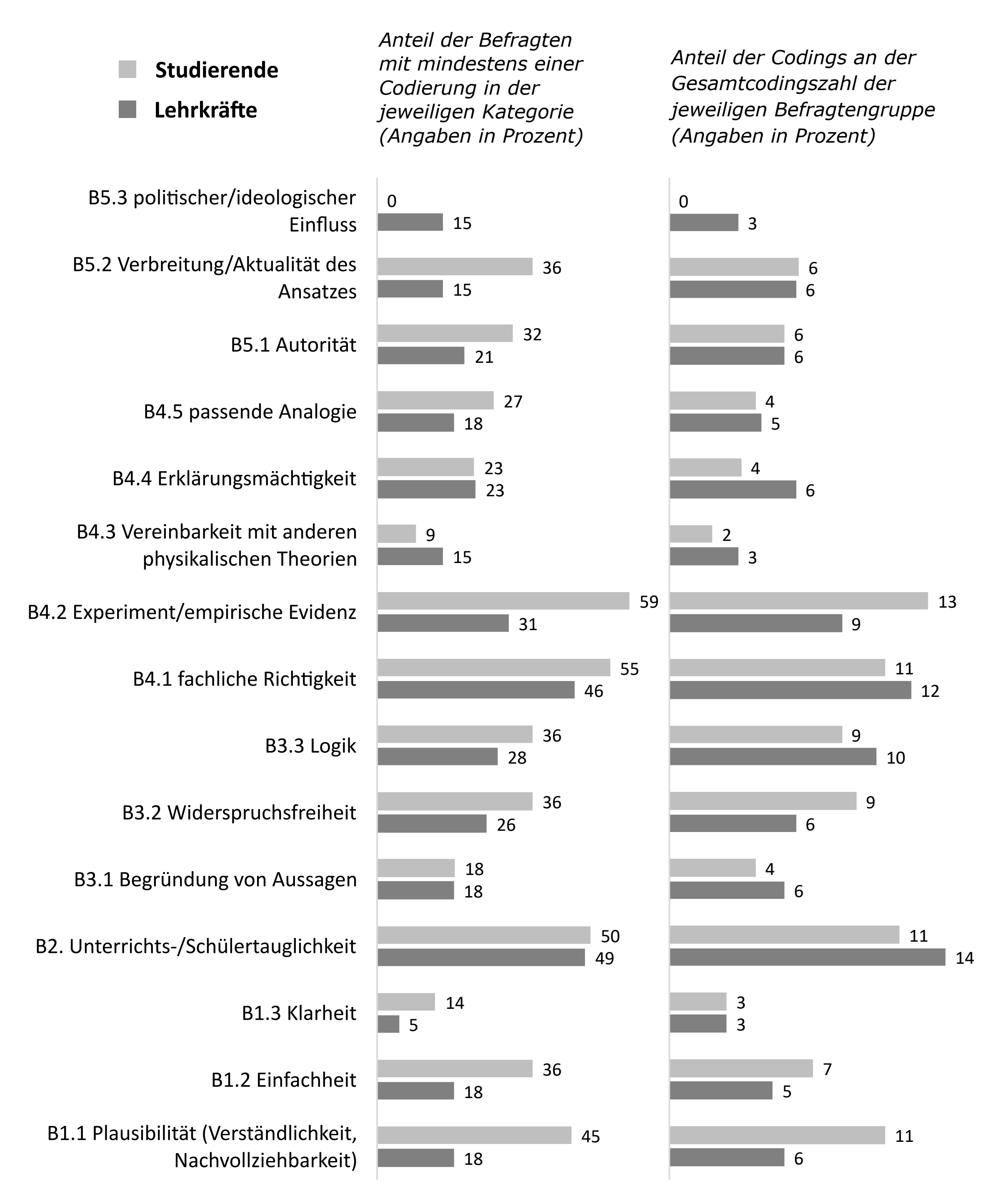


Abbildung 8.8: relative Häufigkeiten für das Kategoriensystem *B*

Auch wenn die Berücksichtigung dieses Kriteriums sehr stark verknüpft mit dem speziellen Textmaterial des Erhebungsinstrumentes sein dürfte, hat es in der Tat seine Berechtigung, die

Bedeutung solcher außerwissenschaftlichen Faktoren für wissenschaftliche Problemstellungen abzuwägen. Im Gegensatz zu wissenschaftlichen Kontroversen spielen diese allerdings wahrscheinlich eine größere Rolle bei Socio-Scientific Issues. Bei den Studierenden kommen keine Codierungen zu diesem Bewertungskriterium vor.

In der Auseinandersetzung mit den Aussagen und Argumenten der unterschiedlichen Fachpositionen kommen auch allgemeine *Kriterien des gültigen Argumentierens/ Schlussfolgerns* (*B3*) zum Tragen. Dabei wird vor allem die *Logik* (*B3.3*) und *Widerspruchsfreiheit* (*B3.2*) der Inhalte beurteilt:

> *Die mathematischen Argumente sind nachvollziehbar und logisch.* (S1B1)

> *wenn Ruhemasse nicht eingeführt wird, dann ist das ein Widerspruch zur Formel $E = mc^2$* (L9F2)

Darüber hinaus wird auch allgemein die *Begründung von Aussagen* (*B3.1*) eines physikalischen Ansatzes oder eines Arguments hinsichtlich der Qualität und Stärke eingeschätzt, zum Beispiel:

> *zweites Material begründet gut, warum dort nicht der Begriff der dynamischen Masse auftaucht → aufgrund der Begründung überzeugender* (S16B2),

oder die Notwendigkeit bzw. der Mangel einer Begründung festgestellt: „*Das nicht Einführen der bewegten Masse finde ich falsch und die Begründungen nicht ausreichend*“ (S10B1).

Das Kategoriensystem zeigt, dass die Studienteilnehmenden im Prozess der Entscheidung über die Art der Darstellung eines kontroversen Fachinhalts im Physikunterricht unterschiedliche, vielfältige Bewertungskriterien nutzen. Ein Großteil der Befragten verwendet dabei Kriterien aus verschiedenen Oberkategorien und berücksichtigt damit mehrere Aspektbereiche. In Bezug auf die beiden Befragtengruppen lassen keine besonders bemerkenswerten, tiefgreifenden Unterschiede zwischen Studierenden und Lehrkräften identifizieren.

8.2.3 *Nature-of-Science*-Vorstellungen

An dieser Stelle werden die Ergebnisse zur Untersuchung der Forschungsfrage FF 2.2 a) mithilfe des Kategoriensystems *NG* (*Nature-of-Science*-Vorstellungen, Gedankenlisten) beschrieben. Dazu wird erläutert, welche *Nature-of-Science*-Vorstellungen von Physiklehrkräften und Physiklehramtsstudierenden bei der Auseinandersetzung mit der wissenschaftlichen Kontroverse zur Relativität der Masse anhand der Auswertung der Gedankenlisten rekonstruiert werden können. In die Analyse wurden 22 Studierenden- und 39 Lehrkräfte-Datensätze einbezogen (siehe Anhang E.2, Tabelle E.10, S. 394). Anhang B5 (S. 350) beinhaltet die exakten Kategoriendefinitionen mit Codierregeln und Beispielen für das Kategoriensystem *NG*, die an dieser Stelle nicht detailliert dargestellt werden sollen. Das Kategoriensystem *NG* wird vollständig in Abbildung 8.9 (S. 204) gezeigt.

Kategorienbasierte Auswertung

Sowohl bei den Lehrkräften als auch bei den Studierenden wurden die meisten Codings in der

Kategorie *Rolle Experiment/Beobachtungen* (*NG3*) vergeben (siehe Abbildung 8.10, S. 206), was für die Bedeutung der damit verbundenen *Nature-of-Science*-Vorstellung spricht. Unter den Studierenden äußerten etwas mehr als die Hälfte dementsprechende Vorstellungen, was deutlich häufiger ist als bei den Lehrkräften. Für die Befragten scheint insbesondere die Funktion von Experimenten und Beobachtungen, wissenschaftliche Erkenntnisse oder Theorien empirisch zu fundieren bzw. nachzuweisen, wichtig zu sein, wie die beiden folgenden Beispiel verdeutlichen:

> *Wie will man diese Theorie komplett ablehnen, wenn sie doch für viele Beobachtungen konsistent ist?* (S12B2)

> *Experimente mit Licht zeigen aber, dass sie sich verhalten, als hätten sie eine Masse (Lichtblitz auf Spiegel → Auslenkung)* (L18F3)

Dabei finden sich auch Aussagen der Studienteilnehmenden, die darauf hindeuten, dass möglicherweise eine „Überinterpretation" der empirischen Bedeutsamkeit von Experimenten stattfindet. Äußerungen der Befragten, wie:

> *Ich glaube es ist experimentell bewiesen, dass* $m_0 \neq m_{bewegt}$ (S7B1),

> *Ist das nicht experimentell gesichert?* (L26F4),

belegen, dass teilweise die Vorstellung zu bestehen scheint, Experimente könnten wissenschaftliche Erkenntnisse „beweisen" bzw. „sicheres Wissen" erzeugen. Diese verkürzte Sicht auf die Stellung experimenteller Daten und Ergebnisse im naturwissenschaftlichen Erkenntnisprozess entspricht allerdings nicht einem angemessenen *Nature-of-Science*-Verständnis und muss insofern kritisch gesehen werden. Günstigere Vorstellungen finden sich im Gegensatz dazu in Verbindung mit der Kategorie *NG4 Subjektivität/Interpretation*. In den Codings dieser Kategorie wird die Subjektivität wissenschaftlichen Wissens thematisiert, insbesondere die Möglichkeit unterschiedlicher Interpretationen des gleichen Sachverhalts (z. B. Interpretationsprozess bei der Analyse von Daten oder Gleichungen) durch Wissenschaftler. Hierbei zeigen sich häufig Schnittmengen mit der Kategorie *NG3*, wenn zusätzlich zu Aspekten der Rolle von Experimenten oder Beobachtungen in der Physik die Möglichkeit unterschiedlicher Interpretationen von Experimenten (bzw. deren Ergebnissen) beschrieben wird, wie zum Beispiel:

> *Experimente zeigen nur: p nicht linear abhängig von v → Interpretation von* m_r *oder Nachweis für* γ, $\gamma m = m_r = m_{bewegt}$ (S8B1)

> *Es sind offensichtlich viele Deutungen bzgl. der Experimente möglich* (L29F5)

Da die Befragten entsprechende Gedanken vornehmlich in Bezug auf Textmaterial 7 hervorbringen, ist davon auszugehen, dass hier ein Stimulus durch das gelesene Textmaterial ursächlich für die Äußerung dieser Vorstellungen ist. Dies spricht dafür, dass die Auseinandersetzung mit einer wissenschaftlichen Kontroverse, bei der empirische Daten teilweise unterschiedlich ausgelegt werden, geeignet ist, um die Reflexion angemessener *Nature-of-Science*-Vorstellungen zur Subjektivität wissenschaftlicher Erkenntnisse auslösen zu können.

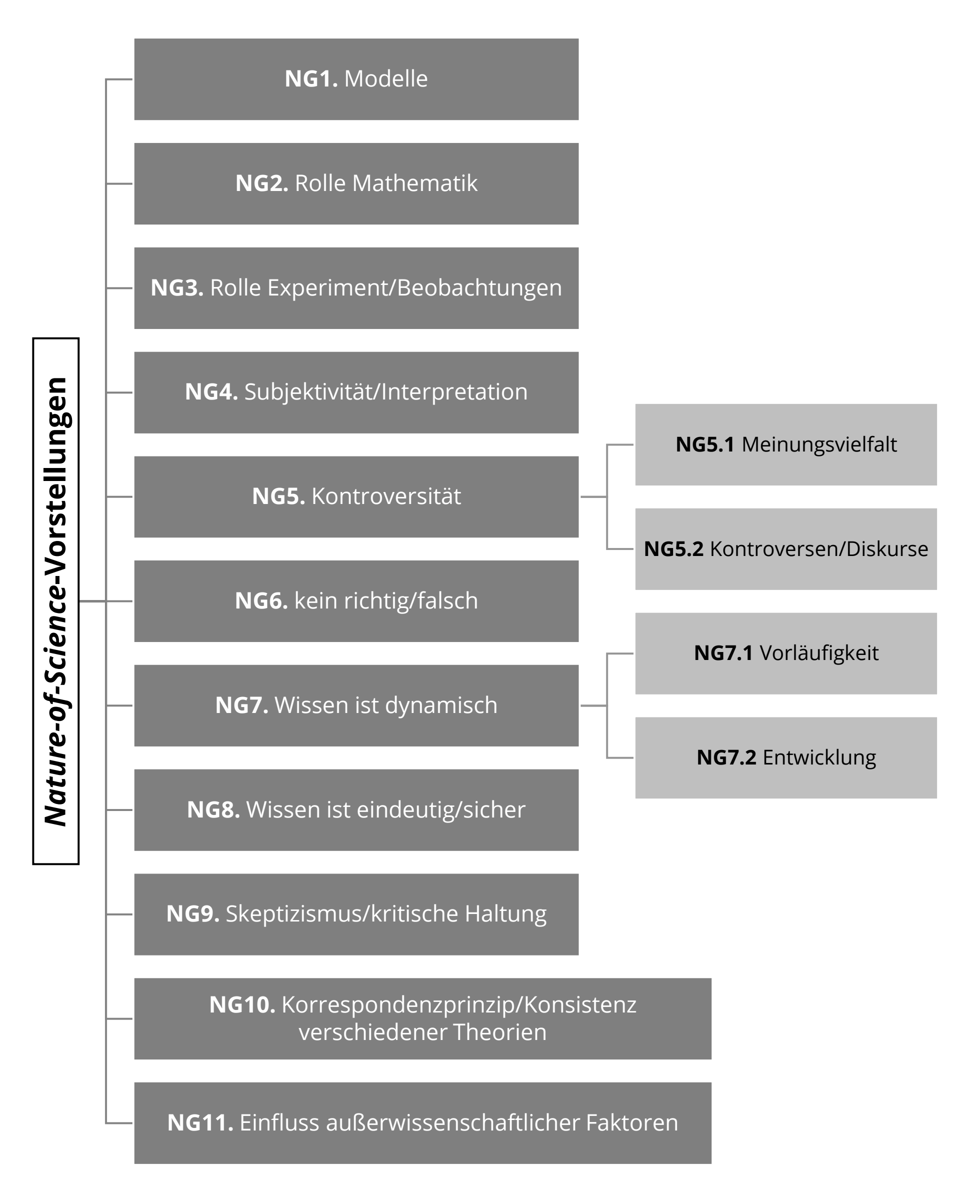


Abbildung 8.9: Kategoriensystem *NG*: *Nature-of-Science*-Vorstellungen (Gedankenlisten)

Neben der Betrachtung des empirischen Charakters der Physik als Naturwissenschaft äußern die Befragten auch Vorstellungen, die im Zusammenhang mit Aspekten des theoretischen Denkens und Arbeitens in den Naturwissenschaften stehen. Darunter lässt sich beispielsweise die Kategorie *NG2 Rolle Mathematik* einordnen, der vor allem Codierungen zugrunde liegen, in denen die Verwendung von Gleichungen bzw. Formeln als Beleg, Begründung oder Beweis physikalischer Aussagen thematisiert werden:

> *Masse unabhängig von Bezugssys. - Beweis Rechnungen (5) (6) (7)* (S1B1)

> *Herleitung/Begründung zu $F = ma\gamma^3$ fehlt! Zweifel!* (L35F5)

Ein kleiner Teil der Studienteilnehmenden bezieht sich in den Gedankenauflistungen auf Merkmale bzw. Eigenschaften von Modellen und Theorien in der Physik (*NG1*) oder die Arbeit hiermit im Allgemeinen. Dazu zählen zum Beispiel Äußerungen hinsichtlich der Grenzen von Modellen, wie bei S12B2:

> *Ist nicht jede Theorie eine Art Modellvorstellung (vgl. Modellvorstellung Licht: Strahl, Welle, Teilchen), die hinsichtlich mancher Phänomene berechtigt ist, anderen Phänomenen gegenüber jedoch nicht?* (S12B2)

Zu den vergleichsweise häufiger vorkommenden Vorstellungen (siehe Abbildung 8.10, S. 206) gehört die Idee der Konsistenz verschiedener physikalischen Theorien untereinander (*NG10*). Dabei verweisen die Befragten entweder auf das Korrespondenzprinzip zwischen der Speziellen Relativitätstheorie und der Newtonschen Physik oder auf die Widerspruchsfreiheit (Vereinbarkeit) von Erkenntnissen vor dem Hintergrund unterschiedlicher physikalischer Theorien:

> *Ziel der SRT ist es, in den Maßstäben der klass. Mechanik widerspruchsfrei zu sein, d.h. eher Grenzfall kleiner Geschwindigkeiten* (S20B2)

> *Die Unterscheidung zwischen Ruhemasse und bewegter Masse ist meines Erachtens richtig auch hinsichtlich der Quantenphysik die später behandelt wird.* (L30F5)

Ein verhältnismäßig hoher Anteil der Codings entfällt auf die Kategorie *NG5 Kontroversität* (siehe Abbildung 8.10, S. 206). Dies ist aufgrund des Erhebungskontextes sicherlich auch zu erwarten. Zu dieser Kategorie gehört zum einen die Vorstellung, dass in der Wissenschaft bzw. unter Wissenschaftlern Kontroversen oder Diskurse im Sinne eines Aushandlungsprozesses wissenschaftlicher Erkenntnisse stattfinden (*NG5.2*), bei denen sich Uneinigkeit unter den Wissenschaftlern zeigt:

> *Offensichtlich ist der Diskurs hier noch nicht abgeschlossen.* (S9B1)

> *große Meinungsverschiedenheit über relativistische Masse* (S10B1)

Gedanken, die lediglich das Vorkommen unterschiedlicher Fachmeinungen zu einem physikalischen Sachverhalt, ohne die kontroverse Auseinandersetzung dieser Fachmeinungen im Sinne eines Diskurses, eines Aushandlungsprozesses thematisieren (z. B. „*Berechtigung beider Ansätze*“, S12B2), wurden der Kategorie *NG5.1 Meinungsvielfalt* zugeordnet und können als

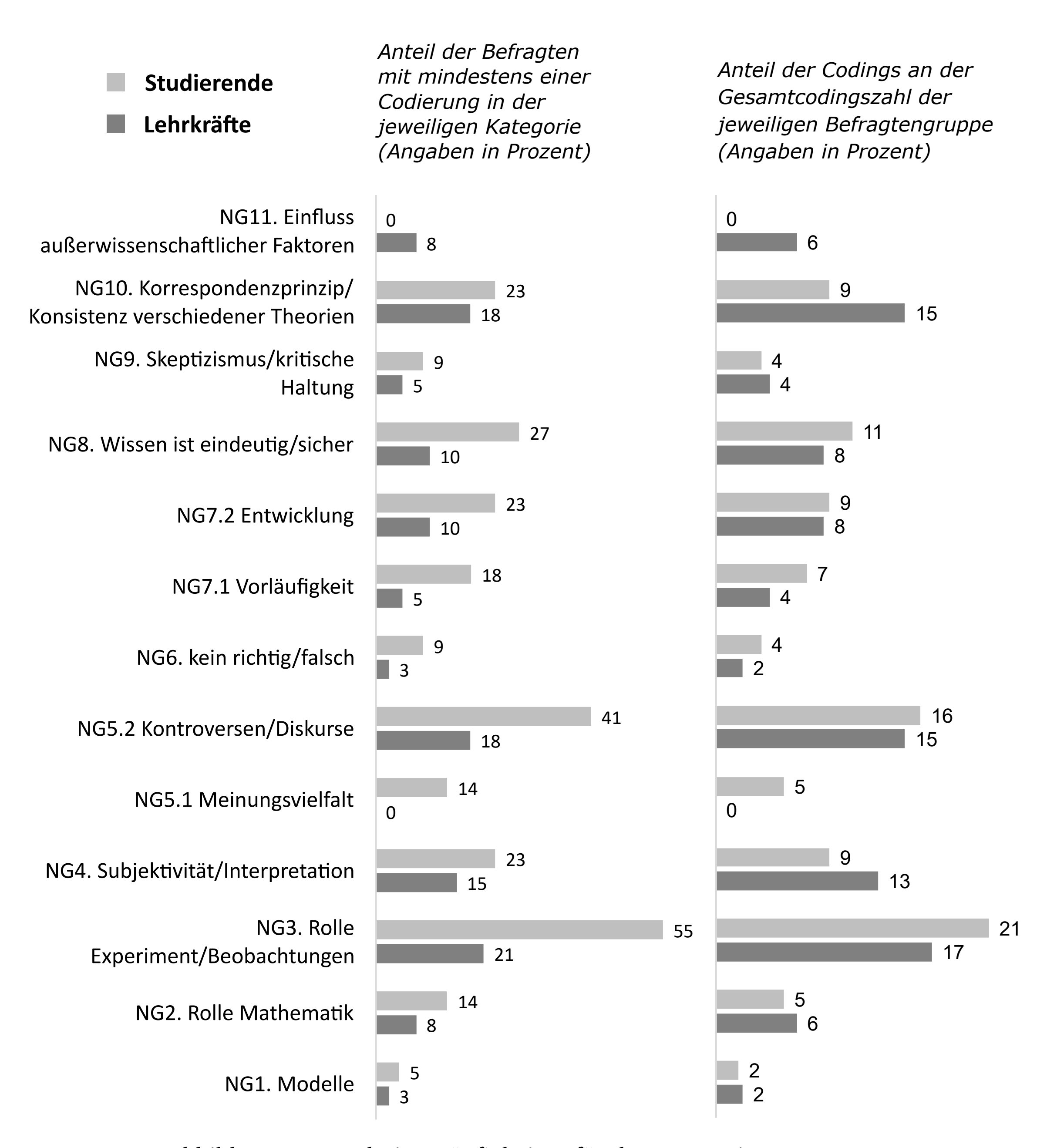


Abbildung 8.10: relative Häufigkeiten für das Kategoriensystem *NG*

„schwacher“ Aspekt von Kontroversität in der Wissenschaft interpretiert werden. Diese Unterkategorie kann ausschließlich bei den Studierenden vorgefunden werden. Eine teilweise ähnliche, jedoch unspezifischere Vorstellung wird in Kategorie *NG6 kein richtig/falsch* abgebildet. Dabei drücken die Befragten aus, dass eine eindeutige Unterscheidung in „richtig“ und „falsch“ in (einem Bereich) der Physik nicht angewendet werden kann.

Ein weiterer wichtiger Bereich der rekonstruierten Vorstellungen betrifft die Dynamik wissenschaftlicher Erkenntnisse. Die Befragten äußern hierzu durchaus Gedanken, die einem angemessenem *Nature-of-Science*-Verständnis zur *Vorläufigkeit* (*NG7.1*) und *Entwicklung* (*NG7.2*) der Erkenntnisse in der Physik entsprechen. So spiegeln die folgenden beiden Beispiele die Ansicht einiger Studienteilnehmenden wider, dass physikalische Begriffe oder Sachverhalte nicht absolut sicher für die Ewigkeit feststehen (*NG7.1*):

> *es scheint, dass alles was man über die SRT in der Schule gelernt hat in gewisser Hinsicht verworfen werden muss* (S12B2)

> *[...] klar machen das es falsch/überholt ist* (S1B1)

Daneben zeigen die Gedankenauflistungen der Befragten die Vorstellung, dass sich das Wissen in der Physik weiterentwickelt, dass neue Erkenntnisse gewonnen und Sachverhalte weiter erforscht werden können (*NG7.2*):

> *neue Erkenntnisse sollen Einfluss haben* (S11B1)

> *die aktuelle Forschung dahingehend noch nicht abgeschlossen ist* (S1B1)

Wissenschaft wird damit zumindest von einem Teil der Befragten explizit nicht als statisches, unveränderliches Theorie- und Wissensgebäude angesehen, wie ein Gedanke von L10F2 zeigt: „*Naturwissenschaften sind ein dynamischer Prozess, sie entwickeln sich*“. Andererseits gibt es einen nicht zu vernachlässigenden Anteil an Studienteilnehmenden, deren Gedankenlisten Hinweise auf die Vorstellung enthalten, wissenschaftliche Erkenntnisse seien eindeutig festgelegt bzw. sicher, also nicht vorläufig (*NG8*).

Äußerungen zur kritischen Auseinandersetzung mit fachwissenschaftlichen Inhalten, wie zum Beipsiel:

> *Es ist also wichtig, Ergebnisse von Experimenten kritisch zu hinterfragen* (S9B1) oder

> *meiner Meinung nach sollte die Gleichung auch kritisch im Unterricht beleuchtet werden; man sollte sie nicht einfach als gegeben hinnehmen* (S16B2),

deuten darauf hin, dass *Skeptizismus* bzw. eine *kritische Haltung* (*NG9*) im Sinne einer Grundeinstellung für wissenschaftliches Arbeiten eine Rolle in den Vorstellungen der Studienteilnehmenden zum Wesen der Wissenschaft spielen.

Ein kleiner Teil der Lehrkräfte thematisiert die Beeinflussung der wissenschaftlichen Praxis durch politische oder ideologische Faktoren (*NG11*), zum Beispiel:

> *Die Gründe für eine Negierung der relativist. Masse können vielfach sein: wissenschaftlicher (Kobel) oder ideologischer (türk. Lehrplan) Natur.* (L26F4)

Dabei sind Codierungen der Kategorie *NG11* analog zu den Erläuterungen für das Bewertungskriterium *B5.3* mit dem Textmaterial 2 des Erhebungsinstrumentes verknüpft und müssen entsprechend eingeordnet werden.

Das Kategoriensystem zeigt, dass anhand der Auseinandersetzung mit einer wissenschaftlichen Kontroverse verschiedene *Nature-of-Science*-Vorstellungen rekonstruiert werden können. Dazu zählen vor allem Aspekte zur empirischen Natur der Physik und zu Aushandlungsprozessen, die im Rahmen kontroverser Diskurse unter Wissenschaftlern stattfinden. Die Studienteilnehmenden äußern daneben auch Gedanken zur Dynamik wissenschaftlicher Erkenntnisse. Bei einem Teil der Befragten wurden Hinweise auf ein eher statisches Bild vom Wesen der Physik als Naturwissenschaft gefunden.

8.3 Handlungsintentionen und -möglichkeiten im Unterrichtskontext

8.3.1 Handlungsintentionen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse im Zusammenhang mit Forschungsfrage FF 2.1 a) und Kategoriensystem *I* (Handlungsintentionen) erläutert. Hierzu wird beschrieben, welche Handlungsintentionen Physiklehrkräfte und Physiklehramtsstudierende bei der Konfrontation mit einer wissenschaftlichen Kontroverse im Unterrichtskontext äußern. In die Analyse der *Lernziele* konnten 22 Studierenden- und 32 Lehrkräfte-Datensätze einbezogen werden, bei den *Vorschlägen zum Vorgehen im Unterricht* waren es 21 Studierende und 28 Lehrkräfte (siehe Anhang E.2, Tabelle E.10, S. 394). Die konkreten Kategoriendefinitionen mit Codierregeln und Beispielen für das Kategoriensystem *I* werden im Anhang B3 (S. 321) aufgeführt, ohne hier im Detail dargestellt zu werden. In Abbildung 8.11 (S. 210) wird das Kategoriensystem *I* vollständig abgebildet.

Kategorienbasierte Auswertung: *Lernziele*

In diesem Abschnitt werden die von den Befragten im Fragebogen 2 angegebenen Lernziele für eine fiktive Unterrichtsstunde zum Thema „Masse in der Speziellen Relativitätstheorie“ zusammengefasst. Dabei gab ein kleiner Teil der Lehrkräfte an, dass es für sie derzeit persönlich nicht möglich ist, solche Lernziele zu formulieren (*IZ1*). Ursache hierfür ist eine bestehende Verunsicherung über die (fachwissenschaftliche) Berechtigung der beiden Ansätze 1 und 2.

Eine deutliche Mehrheit der Studienteilnehmenden formulierte Ziele, welche die Vermittlung der Relativität der Masse (Ansatz 1) beinhalten (*IZ2*). Beispielsweise geben die beiden folgenden Befragten als Unterrichtsziele an:

> *kennen die Formel* $m = \gamma m_0$ (L9F2)

> *Die SuS sind in der Lage, die Abhängigkeit der bewegten Masse von der Geschwindigkeit zu nennen.* (S12B2)

Fast drei Viertel der Studierenden und etwa zwei Drittel der Lehrkräfte äußern sich dahingehend (siehe Abbildung 8.12, S. 211). Damit intendiert ein Großteil der Befragten die Darstellung derjenigen Fachposition im Unterricht, die wahrscheinlich auch ihrer eigenen Position vor der Auseinandersetzung mit der Kontroverse zur Relativität der Masse entspricht.

Rund ein Drittel der Studierenden und ein kleinerer Anteil der Lehrkräfte nennt Lernziele, die im Zusammenhang mit Kontroversität im Unterricht gesehen werden können (*IZ3*). Dies bedeutet einerseits im Umkehrschluss, dass die Mehrheit der Befragten zu diesem Zeitpunkt keine kontroverse Auseinandersetzung mit der Thematik im Physikunterricht anstrebt. Andererseits zeigt sich aber auch, dass es bereits nach einer verhältnismäßig kurzen Problematisierung der beiden unterschiedlichen Ansätze 1 und 2 (mithilfe der Textmaterialien) Lehrkräfte und Studierende gibt, die zumindest teilweise die Kontroversität der Thematik in ihrem Unterricht berücksichtigen möchten. Ein Student gibt dabei an, zumindest die *Probleme eines Ansatzes thematisieren* (*IZ3.1*) zu wollen: „*Die SuS kennen die Probleme mit dem Begriff der be-*

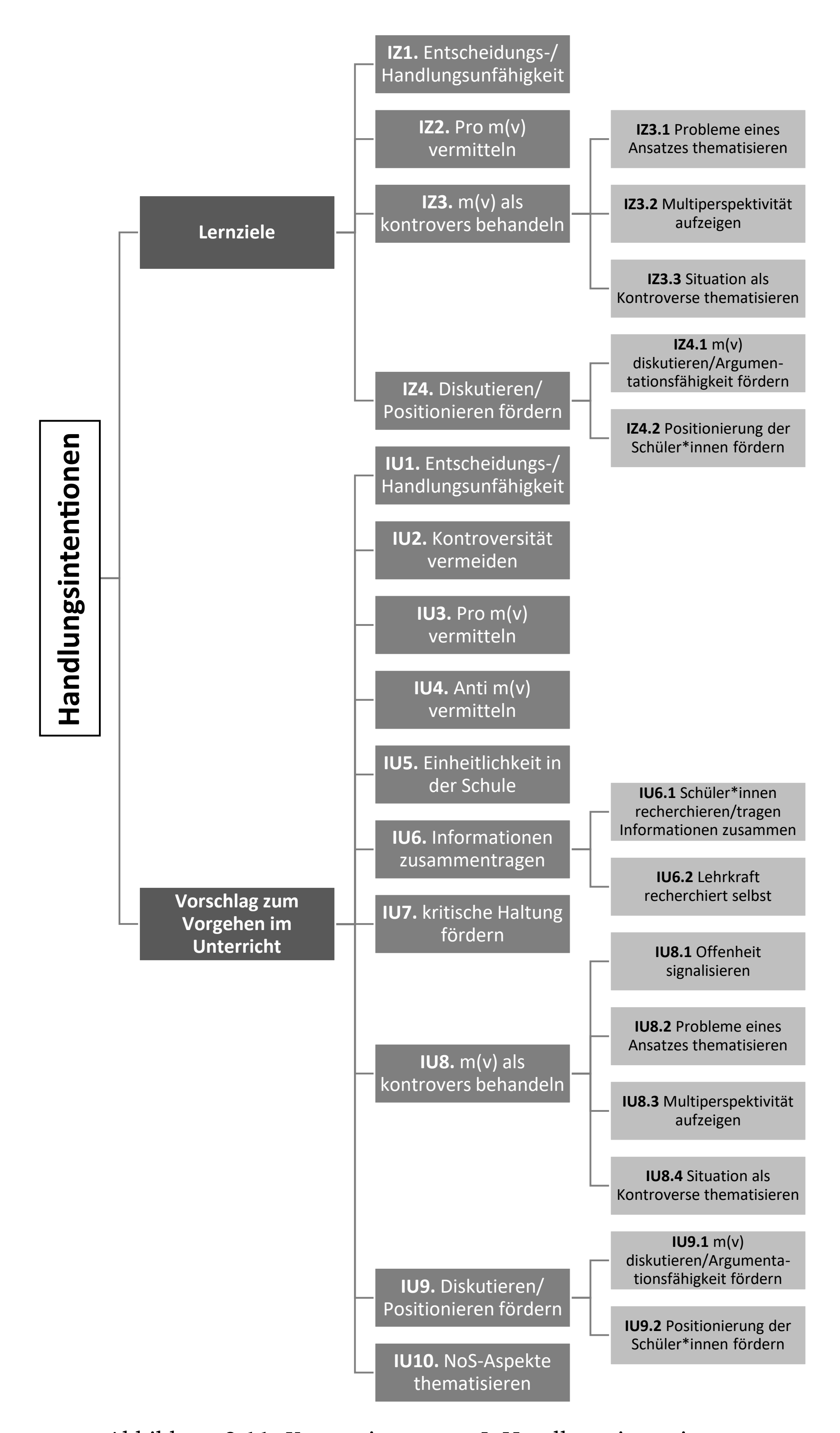


Abbildung 8.11: Kategoriensystem *I*: Handlungsintentionen

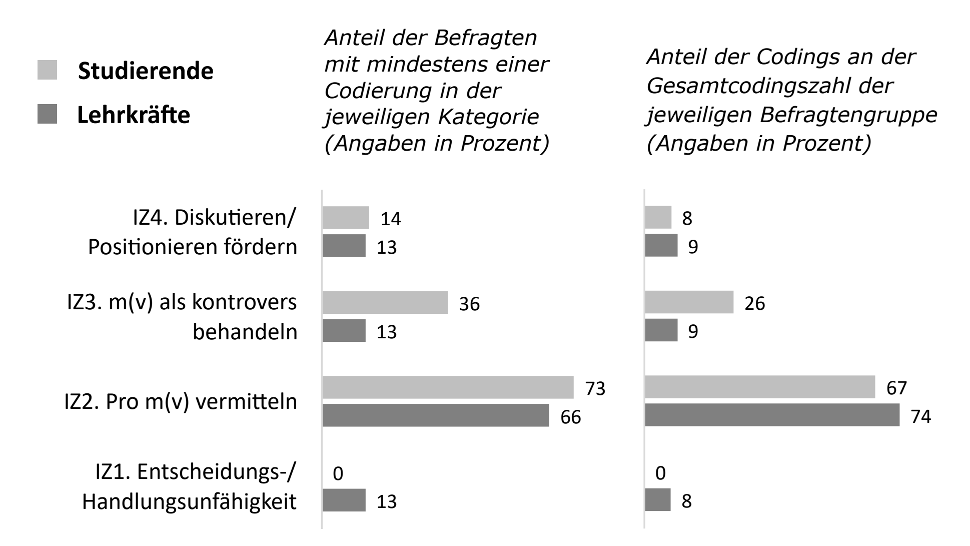


Abbildung 8.12: relative Häufigkeiten der Unterkategorien der Kategorie *Lernziele* des Kategoriensystems *I*

wegten Masse“ (S16B2). Hauptsächlich wird im Zuge von Kontroversität aber angeführt, *Multiperspektivität aufzuzeigen* (*IZ3.2*) oder die *Situation als Kontroverse zu thematisieren* (*IZ3.3*). Unter Multiperspektivität (*IZ3.2*) wird dabei verstanden, dass im Unterricht beide Ansätze 1 und 2 dargestellt bzw. wenigstens die Existenz dieser verschiedenen Perspektiven thematisiert werden soll, wie das Zitat von S9B1 zeigt: „*sollen erkennen, dass mit »die Masse« als Konstrukt verschiedene Auslegungen gemeint sein können.*“ Über diese Anerkennung des Vorhandenseins verschiedener Ansätze hinaus, werden aber auch Lernziele genannt, die eine Einordnung der Diskussion bzw. des Konfliktes zu den beiden Ansätzen enthalten, um auf die kontroverse Natur der Fachthematik aufmerksam zu machen (*IZ3.3*), wie die folgenden beiden Beispiele verdeutlichen:

> *Gewinnen Einblick in Meinungsverschiedenheiten zur Relevanz relativist. Masse* (S10B1)

> *Die Schüler kennen den historisch gewachsenen Konflikt um die Bezeichnungen „Masse“; „relativistische Masse“, „Ruhemasse“* (L14F3)

Einige wenige Studienteilnehmende geben an, eine Diskussion zu den beiden Ansätzen 1 und 2 im Unterricht ermöglichen oder die Lernenden in einer argumentativen Auseinandersetzung mit der Thematik fördern zu wollen (*IZ4.1*): „*können Argumente zur Diskussion über die »Relativität« der Massen nutzen*“ (L7F2). Auch die eigenen Positionierung der Schüler in Bezug auf die Thematik wird von einem kleinen Teil der Befragten intendiert (*IZ4.2*): „*Die SuS können sich aufgrund von Materialien selbst ein Bild machen und sich positionieren*“ (S21B2).

Ziele, die zum Bildungswert wissenschaftlicher Kontroversen im Bereich von *Nature of Science* passen, werden soweit nicht von den Studienteilnehmenden genannt.

Kategorienbasierte Auswertung: *Vorschlag zum Vorgehen im Unterricht*

An dieser Stelle werden die von den Studienteilnehmenden in Bezug auf Textvignette 1 angegebenen Vorschläge zum Vorgehen im Unterricht dargestellt. Im Unterschied zu den Lernzielen lag dabei ein konkreter Stimulus vor, der eine Entscheidung zwischen den unterschiedlichen Handlungsoptionen (Darstellung von Ansatz 1 oder 2 im Unterricht) forcierte. Auch hier gaben einige wenige Befragte an, dass es ihnen aufgrund der eigenen Verunsicherung nicht möglich ist, Handlungsintentionen zu formulieren (z. B. „*Keine Ahnung, das Material hat mich endgültig verwirrt.*“, S3B1).

Der Anteil der Befragten, die Ansatz 1 für die Darstellung im Unterricht intendieren (*IU3*), ist im Vergleich zu den Lernzielen deutlich geringer (siehe Abbildung 8.13, S. 213). Lehrkraft L24F4 spricht diesbezüglich beispielsweise davon, das Unterrichtsthema „*wie gewohnt*“ zu behandeln, was ein Hinweis auf eine erfahrungsbasierte, nichtanalytische Entscheidungsstrategie sein könnte (vgl. Betsch, Funke und Plessner 2011, S. 100). Hierbei wird sich für diejenige Option entschieden, „die man schon früher bevorzugt hatte oder zu der man eine positive Einstellung hat“ (vgl. ebd.). Prinzipiell neu hinzu kommt die Zielstellung, im Unterricht Ansatz 2 zu verfolgen (*IU4*), wie im Beispiel von S14B2: „*Ich würde die Herangehensweise ohne rel. Masse verwenden, weil ein Anstieg der Energie bzw. des Impulses leichter zu verstehen ist.*“ Dies betrifft jedoch nur die zuvor genannte Studentin sowie eine Lehrerin (L7F2).

Der Anteil der Befragten, die einen Zugang wählen würden, der Aspekte von Kontroversität im Unterricht enthält (*IU8*), ist gegenüber den Lernzielen beträchtlich gestiegen. Sowohl bei den Lehrkräften, als auch bei den Studierenden entfallen die meisten Codierungen auf die Kategorie m(v) *als kontrovers behandeln* (*IU8*). Der Anteil der Studierenden, die nun auch mehrheitlich eine kontroversitätsorientierte Behandlung im Unterricht anstreben, ist dabei im Vergleich zu den Lehrkräften bedeutend höher (siehe Abbildung 8.13, S. 213). Den größten Anteil an den Codierungen in der Kategorie *IU8* hat die Unterkategorie *Multiperspektivität aufzeigen* (*IU8.3*). Zusätzlich zu den Handlungsintentionen im Zusammenhang mit Multiperspektivität, die bereits in den Lernzielen genannt werden, äußern sich die Befragten hier auch dahingehend, dass Schüler im Unterricht verschiedene Quellen studieren sollten (z. B. „*Hier bietet sich die große Chance, mal mehrere Lehrbücher in ihren Aussagen zu vergleichen.*“, L1F1). Ein weiterer zusätzlicher Aspekt, der von einigen Lehrkräften geäußert wird, ist *Offenheit zu signalisieren* (*IU8.1*). Die Lehrkräfte drücken dabei aus, dass im Unterricht die verschiedenen Positionen zur Relativität der Masse nicht aufgrund einer vorgefertigten eigenen Meinung als „richtig“ oder „falsch“ beurteilt werden sollten, sondern Offenheit bzw. Toleranz in Bezug auf diese verschiedenen Standpunkte besteht:

> *Oder sie finden wie ich, weiter beide Seiten spannend* (L21F4)

> *Dennoch empfinde ich es als richtig und wichtig den Schüler*innen auch hier nichts vorzuenthalten, sondern beide Seiten als aktuell gleichberechtigt wahr/falsch darzustellen* (S21B2)

Ebenfalls bemerkenswert gestiegen, ist in Relation zu den Lernzielen der Anteil der Befragten, die im Unterricht das *Diskutieren/Positionieren fördern* (*IU9*) möchten (siehe Abbildung 8.13, S. 213). Schüler sollen im Unterricht selbst zu der Problematik der Relativität der

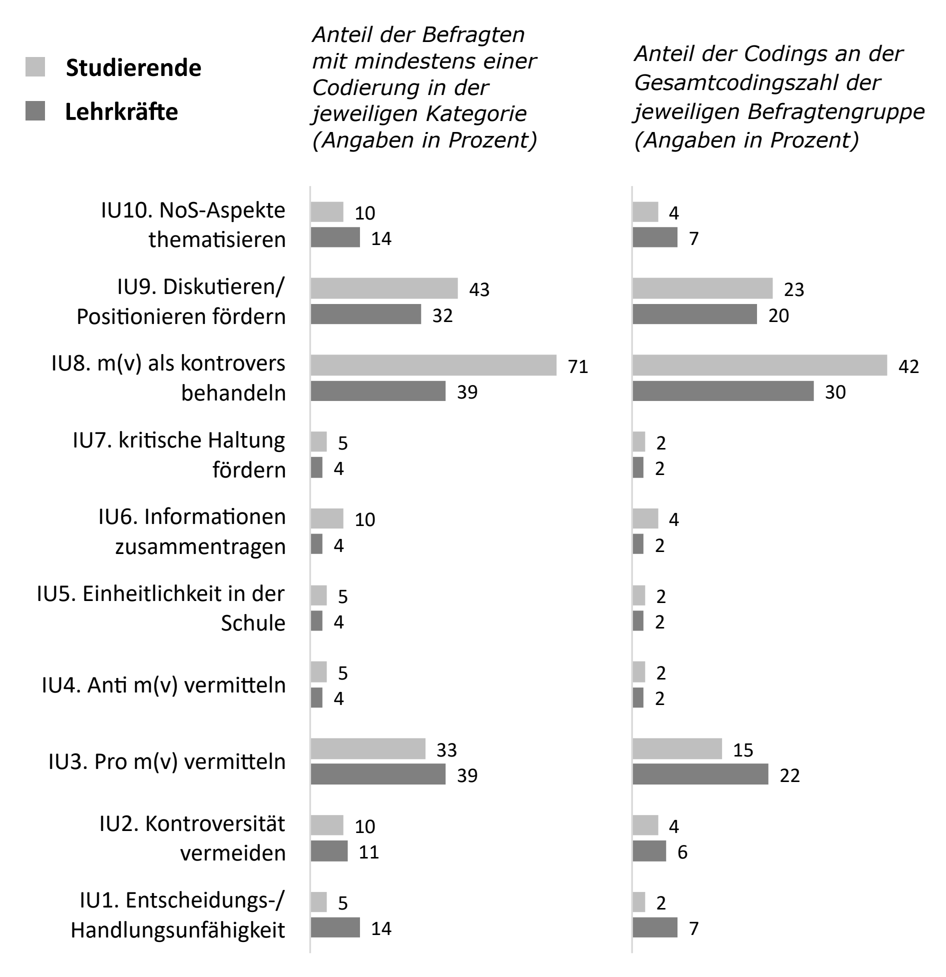


Abbildung 8.13: relative Häufigkeiten der Unterkategorien der Kategorie *Vorschlag zum Vorgehen im Unterricht* des Kategoriensystems *I*

Masse diskutieren bzw. argumentieren (*IU9.1*, z. B. „*lernen Argumente für ein »dafür« bzw. »dagegen« zu finden*“, L9F2) oder sich hierzu positionieren (*IU9.2*). Dazu passt auch, dass Schüler lernen sollen, Inhalte kritisch zu beurteilen oder zu hinterfragen (*IU7*), wie die folgenden beiden Bemerkungen illustrieren:

> *Aber als Lehrer müssen wir die Schüler dazu anhalten Themen kritisch zu betrachten* (L9F2)

> *die Möglichkeit bieten, sich kritisch mit einem wissenschaftl. Inhalt auseinanderzusetzen* (S9B1)

Als weitere Strategie für die Auseinandersetzung mit einem kontroversen Thema wird von wenigen Studienteilnehmenden angegeben, dass *Informationen zusammengetragen* (*IU6*) werden sollen, so dass basierend auf Recherchen der unterrichtenden Lehrkraft oder der Schüler selbst

ein vollständigeres Bild der vorhandenen Informationen und des Problems an sich gezeichnet werden kann.

Unter den Lernzielen noch nicht vorhanden, wird in Reaktion auf Textvignette 1 nun auch vorgeschlagen, im Unterricht *Nature-of-Science-Aspekte zu thematisieren* (*IU10*). Ein kleiner Teil der Befragten zeigt dabei Ansätze, *Nature-of-Science*-Aspekte, wie die Vorläufigkeit und Entwicklung des naturwissenschaftlichen Wissens oder auch Möglichkeiten und Grenzen der Physik als Naturwissenschaft, im Unterricht ansprechen zu wollen. Exemplarisch seien hierzu die folgenden Zitate genannt:

> *in d. modernen Physik sind nicht alle Erkenntnisse sicher, das sollten die Schüler auch erkennen* (L2F1)
>
> *darauf verwiesen werden, dass sich bestimmte Erkenntnisse entwickeln* (L10F2)
>
> *den Schülern klarmachen, dass es sich um eine Theorie handelt, es gibt Probleme, die noch ungelöst sind* (L13F2)

Im Kontrast dazu, die Thematik als kontrovers zu behandeln (*IU8*), kommt es vereinzelt auch zu Äußerungen, die ausdrücken, dass die Darstellung verschiedener Betrachtungsweisen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse (Ansatz 1 und 2) im Unterrichtskontext vermieden werden soll (*IU2*). Dementsprechende Standpunkte, wie zum Beispiel:

> *Um die Schüler nicht zu verwirren bzw. zu verunsichern, würde ich die Diskussion bzgl. der Sinnhaftigkeit des Begriffs „relativistische Masse" auch gar nicht erwähnen.* (L22F4) oder
>
> *Mit der Diskussion beider Theorien kann sich die Uni auseinandersetzen.* (S2B1),

sind allerdings als kritisch anzusehen. Möglicherweise gründet die hinter diesen Aussagen liegende Motivation auf einem Wunsch nach Komplexitätsreduktion (der auch im Sinne der Schüler verstanden werden kann), der unter Umständen auch bei der Idee der *Einheitlichkeit in der Schule* (*IU5*) eine Rolle spielt. Hierbei drücken die Befragten aus, dass in der (jeweiligen) Schule eine einheitliche Vorgehensweise bei der Behandlung der Relativität der Masse im Unterricht herrschen sollte:

> *Einigung innerhalb der Fachschaft auf einen Weg des Herangehens.* (L24F4)
>
> *Ja, ich finde es muss für uns als Lehrkräfte eindeutig festgelegt sein* (S8B1)

Zusammenfassend sollen an dieser Stelle zwei Gesichtspunkte hervorgehoben werden:
Erstens scheint auch hinsichtlich der Handlungsintentionen ein größerer Teil der Studierenden offen gegenüber den verschiedenen kontroversen Fachpositionen (Ansatz 1 und 2) zu sein, als es bei den Lehrkräften der Fall ist. Dies zeigt sich anhand der Anteile derjenigen mit Codierungen in den Kategorien *IU8* bzw. *IZ3* (siehe Abbildung 8.13, S. 213 und Abbildung 8.12, S. 211) und ist konsistent zu dem Befund in Kapitel 8.2.1 (ab S. 186). Zweitens lässt sich in

Reaktion auf Textvignette 1 jeweils ein größerer Anteil an Befragten gegenüber den Lernzielen feststellen, die im Unterricht Diskussionen und den Austausch von Argumenten anstreben, *Nature-of-Science*-Aspekte beleuchten möchten sowie die Thematik insgesamt als kontrovers behandeln wollen. Das könnte ein Hinweis darauf sein, dass das Vorgehen und die fachliche Darstellung im Unterricht explizit hinterfragt werden sollten, um Lehrende für Kontroversität in Bezug auf ein Unterrichtsthema sensibilisieren zu können.

8.3.2 Handlungsmöglichkeiten

An dieser Stelle werden die Ergebnisse im Zusammenhang mit Forschungsfrage FF 2.1 b) und Kategoriensystem *H* (Handlungsmöglichkeiten) erläutert. Es wird beschrieben, welche Handlungsmöglichkeiten Physiklehrkräfte und Physiklehramtsstudierende bei der Konfrontation mit einer wissenschaftlichen Kontroverse im Unterrichtskontext äußern. Für die Auswertung der Handlungsmöglichkeiten bei der *Umsetzung im Unterricht* (Vignetten 2A und 2B) wurden 20 Studierenden- und 31 Lehrkräfte-Datensätze berücksichtigt. Bei den Handlungsmöglichkeiten *nach Feedback* (Vignette 3) wurden die Antworten von 16 Studierenden und 25 Lehrkräften analysiert (siehe Anhang E.2, Tabelle E.10, S. 394). Alle Kategoriendefinitionen mit Codierregeln und Beispielen für das Kategoriensystem *H* sind dem Anhang B4 (S. 335) zu entnehmen und werden hier nicht im Detail vorgestellt. Abbildung 8.14 (S. 216) zeigt das vollständige Kategoriensystem *H*. Da das Kategoriensystem *H* große inhaltliche Ähnlichkeiten mit dem Kategoriensystem *I* besitzt, werden im Folgenden vor allem Unterschiede zu den Ergebnissen des Kapitels 8.3.1 (S. 209) sowie zwischen den Lehrkräften und Studierenden hervorgehoben oder neu hinzugekommene Kategorien beleuchtet.

Kategorienbasierte Auswertung: *Umsetzung im Unterricht*

Dieser Abschnitt gibt Auskunft über die von den Studienteilnehmenden im Zusammenhang mit den beiden Textvignetten 2A und 2B geäußerten Handlungsmöglichkeiten. Eine Lehrkraft sah sich aufgrund der fachwissenschaftlichen Verunsicherung durch die Kontroverse außer Stande, geeignete Handlungsmöglichkeiten zu formulieren (*HU1*).

Sind die Befragten mit einer fiktiven, aber konkreten Unterrichtssituation konfrontiert, in der die beide Ansätze 1 und 2 der wissenschaftlichen Kontroverse um die Relativität der Masse von Schülern thematisiert werden, geben vier Fünftel der Studierenden und etwa jede zweite Lehrkraft an, dass sie die Thematik zumindest teilweise *als kontrovers behandeln* (*HU7*) möchten (siehe Abbildung 8.15, S. 217). Dies ist im Vergleich zu den Handlungsintentionen (siehe Kapitel 8.3.1, S. 209) ein jeweils etwas größerer Anteil der Befragten. Die Codierungen in dieser Kategorie (*HU7*) werden vor allem durch die Unterkategorien *Multiperspekivität aufzeigen* (*HU7.3*) und *Offenheit signalisieren* (*HU7.1*) dominiert. Während in der Unterkategorie *HU7.3* ähnliche Anteile an Studierenden und Lehrkräften Codierungen besitzen, ist es in der Unterkategorie *HU7.1* jedoch ein deutlich höherer Anteil der Studierenden (fast zwei Drittel) im Vergleich zu den Lehrkräften (etwa ein Viertel). Auch im Bereich *Diskutieren/Positionieren fördern* (*HU8*) zeigt sich dieser Unterschied zwischen den Befragtengruppen (siehe Abbildung 8.15, S. 217). Damit stehen die Lehramtstudierenden Aspekten von Kontroversität sowie der Förderung von Diskussionsgelegenheiten im Unterricht möglicherweise häufiger offen gegenüber,

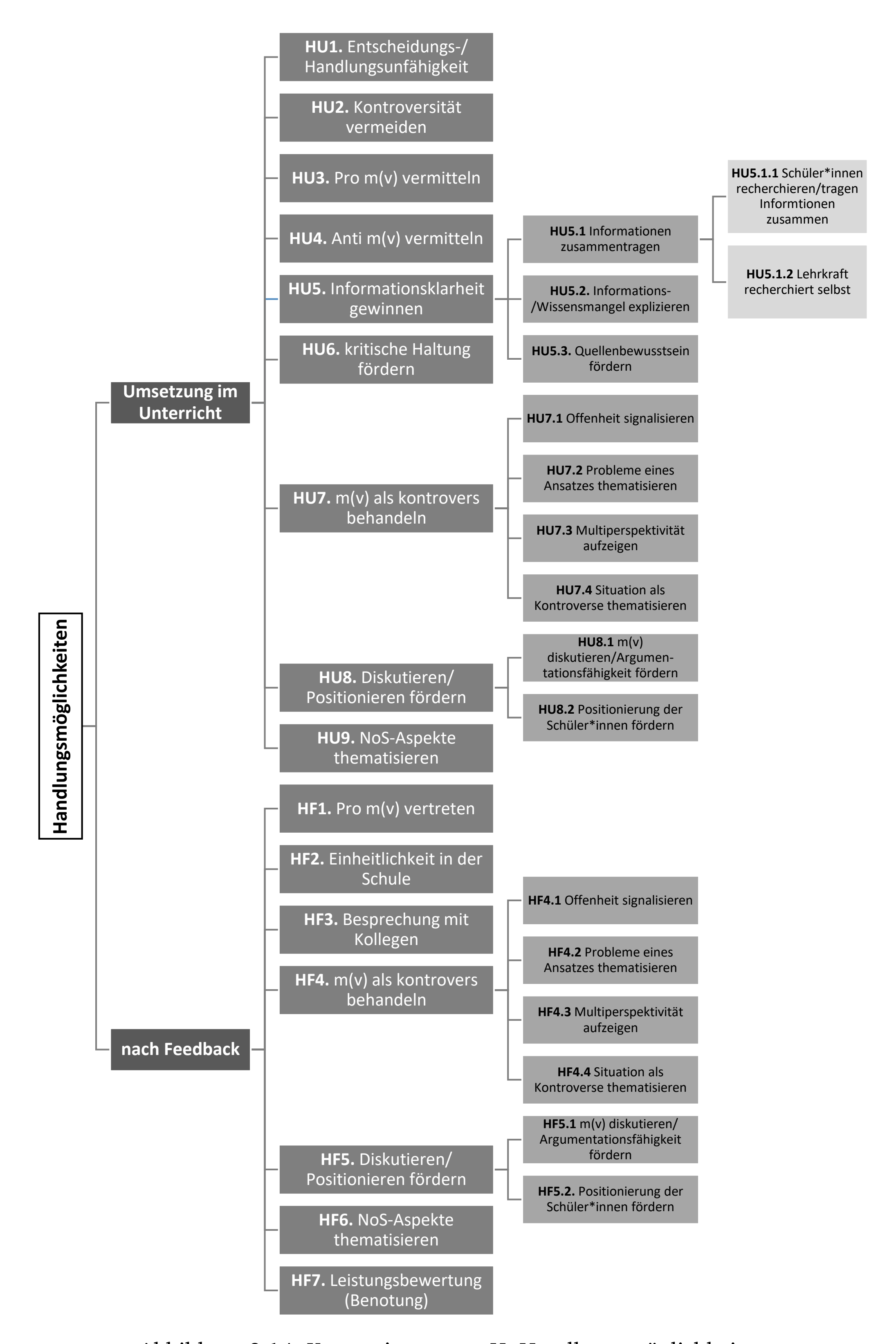


Abbildung 8.14: Kategoriensystem *H*: Handlungsmöglichkeiten

als es bei den Lehrkräften der Fall ist. Ein kleiner Teil der Studienteilnehmenden äußert sich allerdings auch dahingehend, dass die Darstellung verschiedener Betrachtungsweisen im Unterricht vermieden werden soll (*HU2*), wie das Beispiel von L5F1 zeigt: „*So eine HA würde ich nicht stellen und mich auf solche Probleme nicht einlassen.*" Im Bereich der Positionierung für einen der beiden Ansätze 1 oder 2 überwiegt (wie schon bei den Handlungsintentionen) klar der Anteil derer, die Ansatz 1 (*HU3*) vermitteln würden (siehe Abbildung 8.15).

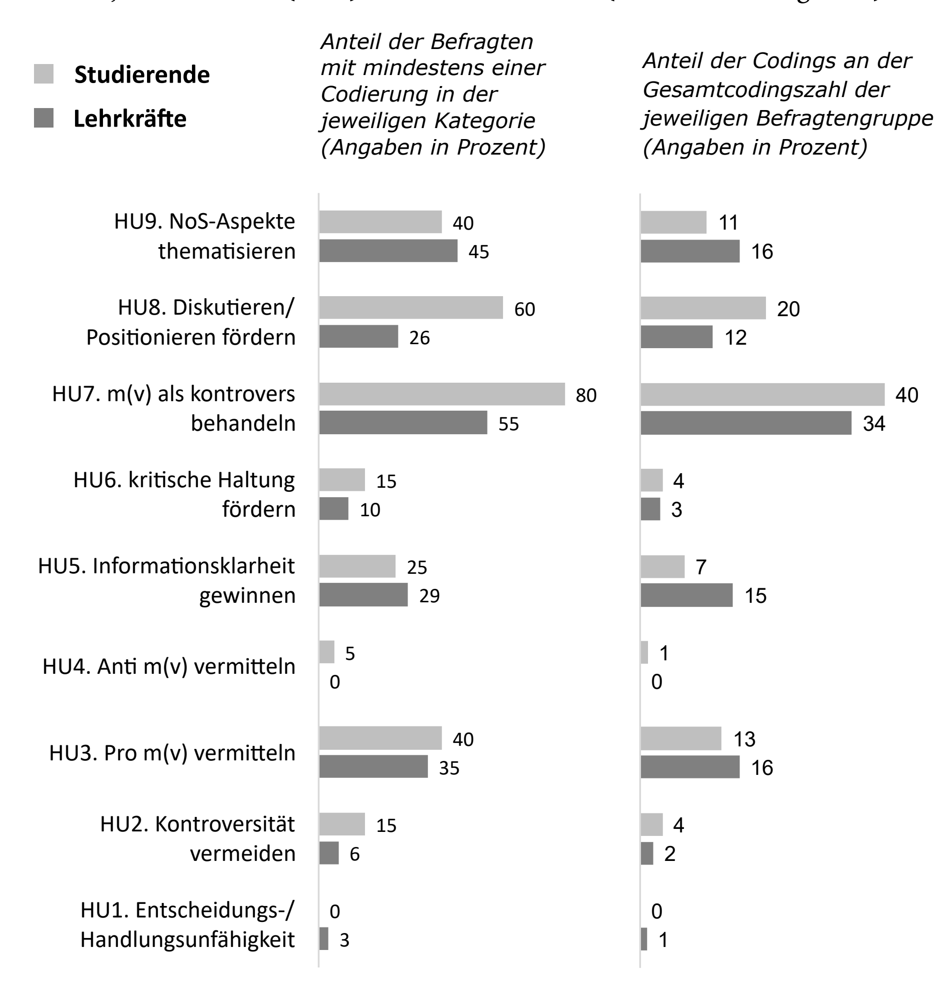


Abbildung 8.15: relative Häufigkeiten der Unterkategorien der Kategorie *Umsetzung im Unterricht* des Kategoriensystems *H*

Bemerkenswert ist das häufigere Vorkommen der Kategorie *NoS-Aspekte thematisieren* (*HU9*) in den Handlungsmöglichkeiten gegenüber den Handlungsintentionen (siehe Abbildung 8.15). Im Unterrichtszusammenhang werden dabei *Nature-of-Science*-Aspekte wie die Vorläufigkeit oder Entwicklung naturwissenschaftlichen Wissens sowie Möglichkeiten und Grenzen der Physik als Naturwissenschaft beleuchtet, zum Beispiel:

> *[...] sagen, dass die Physik eine Naturwissenschaft ist, aber die Erkenntnisse noch nicht abschließend feststehen müssen.* (S11B1)

> *»Die Physik als Wissenschaft« entwickelt sich auch weiter* (L12F2)

> *Es gibt in der Physik keine absoluten Beweise zur Begründung verschiedener Theorien. Man kann Theorien nur belegen.* (S7B1)

Hinsichtlich der Häufigkeit von Codierungen dieser Kategorie muss allerdings berücksichtigt werden, dass in die Konzeption von Textvignette 2B typische *Nature-of-Science*-Schülervorstellungen einbezogen wurden (siehe Kapitel 6.3, S. 174), so dass ein Stimulus für die Studienteilnehmenden vorliegt, der Aussagen im Bereich von *Nature of Science* provozieren kann.

Zusätzlich zur Kategorie *Informationen zusammentragen* in den Handlungsintentionen (*HU 5.1*) werden von den Befragten weitere Handlungsmöglichkeiten zur Gewinnung von Informationsklarheit (*HU5)* genannt. Dazu zählt zum einen, dass *Informations-/ Wissensmangel expliziert* (*HU5.2*) wird, die Befragten also ausdrücken, dass bestimmte Informationen nicht bekannt bzw. bisher nicht bekannt gewesen sind, wie beispielsweise bei L43F6: „*Vielleicht gibt es noch immer diese Diskussion in der Wissenschaft!?*“ Zum anderen weisen Aussagen der Studienteilnehmenden, wie

> *Quellenangaben erforderlich* (L28F4) oder

> *Grundsätzlich Internet als kritische Quelle betrachten → wo gelesen? Eine Uniseite, ein Forum, ... ?* (S12B2),

darauf hin, dass im Unterricht ein Bewusstsein für die Quellen von Informationen vermittelt werden soll (*HU5.3*). Dabei kann die Fundierung von Informationen durch Angabe deren Quelle bzw. Hinweisen zur Qualität einer Quelle (Glaubwürdigkeit) insgesamt eine Rolle spielen.

Kategorienbasierte Auswertung: *nach Feedback*

Im Folgenden werden einige von den Befragten im Zusammenhang mit Textvignette 3 geäußerte Handlungsmöglichkeiten dargestellt.

In rund einem Drittel der ausgewerteten Datensätze findet sich der Wunsch, dass ein einheitliches Vorgehen (*HF2*) der Physiklehrkräfte einer Schule bei der Behandlung der kontroversen Thematik bestehen sollte (siehe Abbildung 8.16, S. 219):

> *ein „einheitlicher“ Standpunkt innerhalb der Fachschaft ist sicher begrüßenswert* (L10F2)

> *Die Schule sollte sich auf einen Weg im Kollegium einigen* (S20B2)

Damit entfällt insgesamt ein deutlich höherer Anteil der Codierungen auf diese Kategorie als noch bei den Handlungsintentionen (*IU5*). Es ist denkbar, dass die Idee einer einheitlichen Lösung gerade deshalb vermehrt als Reaktion auf ein Feedback durch die Umwelt vorgebracht wird, weil damit weniger „Angreifbarkeit“ bzw. mehr Sicherheit im Umgang mit der wissenschaftlichen Kontroverse verbunden sein könnte. Hierzu passt auch, dass die *Besprechung mit Kollegen* (*HF3*) ebenfalls einen wichtigen Stellenwert für die Befragten einzunehmen scheint (siehe Abbildung 8.16, S. 219). Eine Absprache mit Fachkollegen kann einerseits zur Aufklärung der Situation (z. B. „Vor dem Elterngespräch würde ich mit dem Kollegen reden, um genau

zu wissen, was er vermittelt hat“, L30F5) oder andererseits zur fachlichen und fachdidaktischen Beratung (z. B. „Klärung in der Fachschaft Physik“, L15F3) dienen. Neben dem Gedanken kooperativer Zusammenarbeit ist damit aber wahrscheinlich auch die Möglichkeit einer Entlastung von der eigenen individuellen Verantwortung durch den Einbezug der Fachkollegen verknüpft. Der Beschluss eines gemeinsamen Vorgehens der Fachkollegen oder zumindest die Rückversicherung durch den Austausch mit den selbigen ermöglicht den Physiklehrenden eine Rechtfertigungsbasis für die getroffenen fachdidaktischen Entscheidungen bzw. für die gewählte Darstellung eines wissenschaftlich kontroversen Themas im Unterricht.

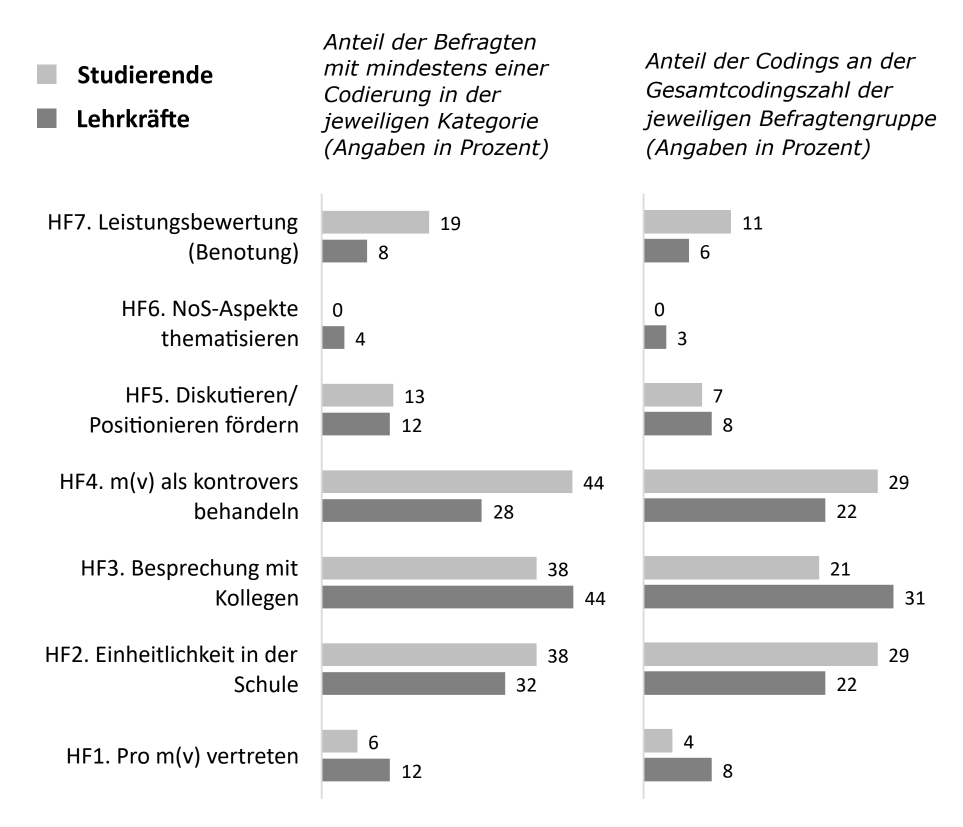


Abbildung 8.16: relative Häufigkeiten der Unterkategorien der Kategorie *nach Feedback* des Kategoriensystems *H*

Ausgelöst durch Textvignette 3 äußern sich die Studienteilnehmenden vereinzelt auch zur *Leistungsbewertung (Benotung)* (*HF7*), zum Beispiel in Klausuren oder dem Abitur. Dabei wird unter anderem zum Ausdruck gebracht, dass den Lernenden aufgrund von Kontroversität im Unterricht keine Nachteile in Leistungsbewertungssituationen entstehen sollen, das heißt, es müssten dann verschiedene Ansätze bzw. Fachpositionen anerkannt werden:

> *Keine der Sichtweisen ist jedoch falsch und wird in einer Klausur oder im Abitur sanktioniert werden.* (S16B2)

> *kein Nachteil für Schüler in der Prüfung* (L23F4)

Zusammenfassend können drei wesentliche Aspekte im Hinblick auf die Handlungsmöglichkeiten im Unterrichtskontext festgehalten werden:
Einerseits gibt es Hinweise darauf, dass die Studierenden womöglich häufiger offen für Aspekte von Kontroversität (*HU7*) und die Förderung von Diskussionsgelegenheiten (*HU8*) im Physikunterricht sind, als es bei den Lehrkräften der Fall ist. Ein zumindest teilweise ähnliches Bild zeigte sich bereits anhand der Auswertung der Gedankenlisten (siehe Kapitel 8.2.1, ab S. 186) und der Handlungsintentionen (siehe Kapitel 8.3.1, ab S. 209). Zweitens scheinen wissenschaftliche Kontroversen im Unterricht Gelegenheiten zu bieten, *Nature-of-Science*-Aspekte thematisieren zu können (*HU9*). Als dritter Punkt soll hervorgehoben werden, dass für die Studienteilnehmenden die Absprache mit Kollegen sowie ein einheitliches fachdidaktisches Vorgehen an der Schule relevant ist, vermutlich weil dies in Teilen eine Reduktion von Komplexität oder auch Verantwortung gestattet.

8.3.3 *Nature-of-Science*-Aspekte im Unterrichtskontext

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zum Kategoriensystem *NV* (*Nature-of-Science*-Aspekte im Unterrichtskontext, Vignetten) im Hinblick auf die Forschungsfrage FF 2.2 b) dargestellt. Dazu wird erläutert, welche *Nature-of-Science*-Aspekte von den Physiklehrkräften und Physiklehramtsstudierenden im Zusammenhang mit einer wissenschaftlichen Kontroverse im Unterrichtskontext thematisiert werden. Insgesamt konnten hierzu die Daten von 33 Lehrkräften und 21 Lehramtsstudierenden analysiert werden (siehe Anhang E.2, Tabelle E.10, S. 394). Die Definitionen der Kategorien mit den entsprechenden Codierregeln und Beispielen können in Anhang B6 (S. 356) nachgelesen werden. Das komplette Kategoriensystem *NV* wird in Abbildung 8.17 (S. 221) gezeigt.

Kategorienbasierte Auswertung

Ein verhältnismäßig häufig thematisierter *Nature-of-Science*-Aspekt ist die *Kontroversität* (*NV5*) in der Wissenschaft. Dazu zählen Äußerungen, in denen die Befragten darauf eingehen, dass zu einem physikalischen Sachverhalt unterschiedliche Fachmeinungen vorkommen können (*NV5.1*), wie zum Beispiel: „*beide Meinungen zur Zeit in der Wissenschaft vertreten*“ (L2F1). Konkreter wird die Existenz von *Kontroversen/Diskursen* (*NV5.2*) in der Wissenschaft bzw. unter Wissenschaftlern aber auch im Sinne eines Aushandlungsprozesses wissenschaftlicher Erkenntnisse beschrieben:

> *Ich würde sagen, dass diese beiden gegenteiligen Meinungen momentan unter den Physikern kontrovers diskutiert werden, es noch keine einheitliche „neue“ Lehrmeinung gibt.* (L22F4)

Auch hier zeigt sich konform zu den bisherigen Ergebnissen, dass im Vergleich zu den Lehrkräften ein größerer relativer Anteil der Studierenden Codierungen in diesem Bereich besitzt (siehe Abbildung 8.18, S. 223).

Möglicherweise im Zusammenhang damit, dass in den Naturwissenschaften unterschiedliche fachliche Standpunkte zu einer Fragestellung bestehen können, bringen einige Befragte zum Ausdruck, dass es „*kein »richtig« und kein »falsch«*“ (S22B2) in der Physik als Naturwissenschaft gibt bzw. diese Begriffe nicht angewendet werden können (*NV6*). Auch dieser relativ

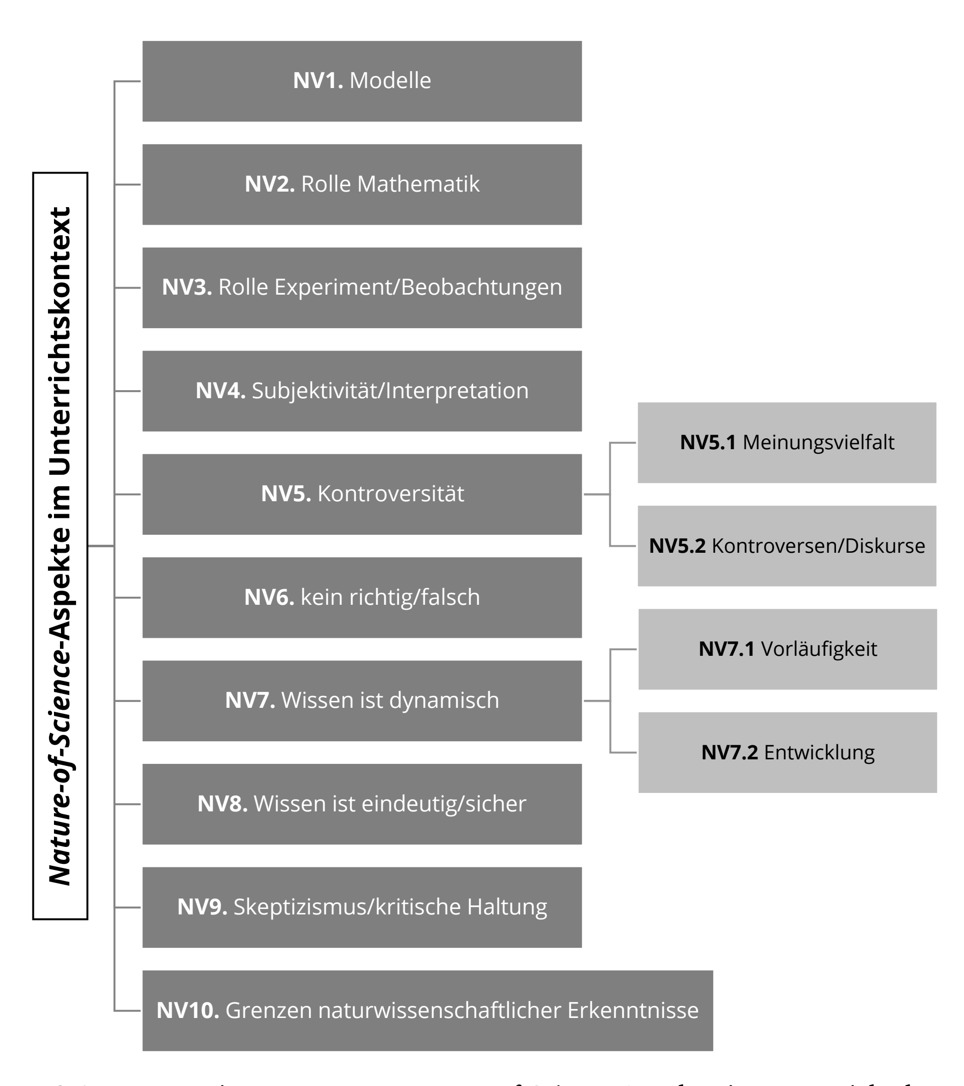


Abbildung 8.17: Kategoriensystem *NV*: *Nature-of-Science*-Aspekte im Unterrichtskontext (Vignetten)

unspezifische *Nature-of-Science*-Aspekt konnte häufiger unter den Studierenden gefunden werden (siehe Abbildung 8.18, S. 223).

Verhältnismäßig häufig kommen Codierungen in der Kategorie *Wissen ist dynamisch* (*NV7*) vor. Die Studienteilnehmenden thematisieren dabei die *Vorläufigkeit* (*NV7.1*) wissenschaftlicher Erkenntnisse, indem sie naturwissenschaftliches Wissen zum Beispiel als nicht sicher, absolut oder feststehend bzw. als nicht abschließend geklärt beschreiben, wie die folgenden Beispiele verdeutlichen:

> *auch in der Physik ist nicht alles abschließend geklärt* (S22B2)
> *in den Naturwissenschaften noch nichts als „unverrückbar" und absolut angesehen werden kann* (S13B2)

Als weiterer Aspekt der Dynamik wissenschaftlicher Erkenntnisse wird von den Befragten auf die *Entwicklung* (*NV7.2*) wissenschaftlichen Wissens verwiesen. Lehrkräfte und Studierende geben hierbei an, dass in der Wissenschaft neue, aktuelle Erkenntnisse vorgelegt werden können, Sachverhalte weiter erforscht werden und sich das Wissen in den Naturwissenschaften weiterentwickelt, Wissenschaft also ein dynamischer Prozess ist:

> *Es ist möglich, dass die Wissenschaft dazu neue Erkenntnisse hervorbringt* (L33F5)

> *[…] dass sich bestimmte Erkenntnisse entwickeln* (L10F2)

> *Letztendlich ist die Wissenschaft doch immer einer gewissen Dynamik unterworfen* (S22B2)

Im Vergleich zwischen Lehrkräften und Studierenden zeigt sich, dass ein etwas größerer Anteil der Studierenden Codierungen in der Kategorie *Vorläufigkeit* (*NV7.1*) besitzt.

Im Kontrast dazu wird jedoch von einem kleinen Teil der Lehrkräfte und einem höheren Anteil der Lehramtsstudierenden auch der Vorstellung Ausdruck verliehen, wissenschaftliche Erkenntnisse seien sicher, abgeschlossen (also nicht vorläufig) oder eindeutig festgelegt (*NV8*). So gibt S21B2 an, es sei „*durchaus kritisch zu sehen, wenn Dinge nicht klar als richtig oder falsch angesehen werden.*" L10F2 spricht davon, dass Erkenntnisse „*zum entsprechenden Zeitpunkt als »richtig« bewiesen werden können*". Zum Teil zeugen die in diesem Bereich codierten Aussagen von der Vorstellung, dass Wissensbestände zwar noch offen und nicht eindeutig festgelegt sein können (Aushandlungsprozesse in der Wissenschaft werden also akzeptiert), aber in der Zukunft eine endgültige Lösung und damit gesicherte Erkenntnisse gefunden werden (z. B. „*Eine endgültige Antwort gibt es dafür noch nicht*", S11B1). Zwei Studierende artikulieren insgesamt betrachtet ein eher inkonsistentes Bild vom Wesen der Naturwissenschaften, da sie sowohl Codierungen in den Kategorien *Vorläufigkeit* (*NV7.1*) als auch *Wissen ist eindeutig/sicher* (*NV8*) aufweisen.

Wahrscheinlich um Fachinhalte in Bezug auf die wissenschaftliche Kontroverse für Schüler besser einordnen zu können, thematisieren die Befragten zum Teil auch die *Grenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnisse* (*NV10*) und Forschung im Unterrichtskontext. Dabei werden auch allgemeine Limitationen naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung vermittelt, wie im Beispiel von S7B1: „*Es gibt in der Physik keine absoluten Beweise zur Begründung verschiedener*

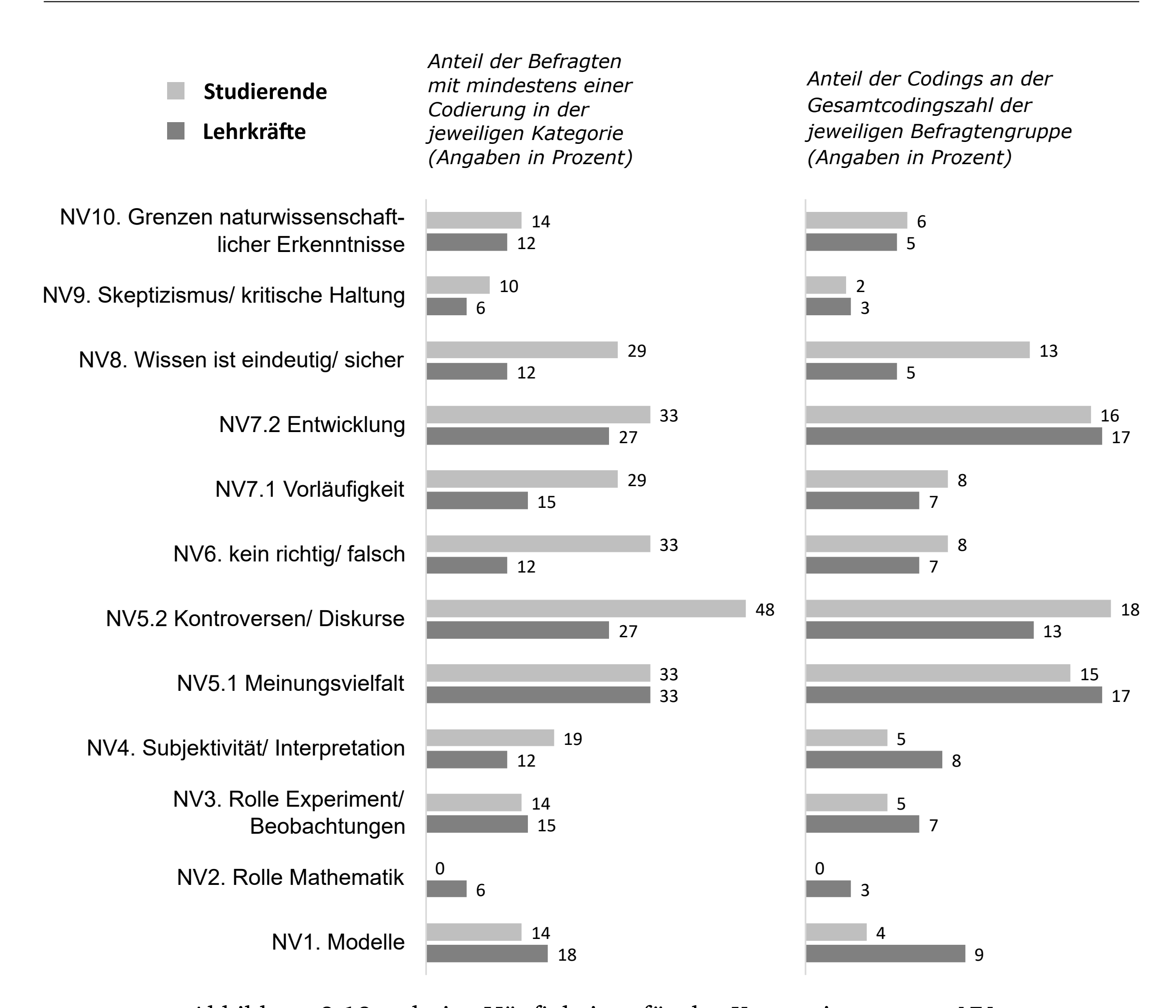


Abbildung 8.18: relative Häufigkeiten für das Kategoriensystems *NV*

Theorien. Man kann Theorien nur belegen.“ (S7B1). In gewisser Weise können diese Grenzen die Diskrepanz zwischen zwei unterschiedlichen gegensätzlichen fachwissenschaftlichen Positionen erklären und so das Verständnis von Kontroversität in der Wissenschaft unterstützen.

Aussagen zu Grenzen von Modellen oder physikalischen Theorien bei der Beschreibung physikalischer Phänomene (z. B. der beschränkte Gültigkeitsbereich) werden der Kategorie *Modelle* (*NV1*) zugeordnet (z. B. „*klassische Denkweisen führen bei sehr hohen Geschwindigkeiten nicht zur widerspruchsfreien Lösung*“, L18F2). Diese Kategorie zeigt, dass die Befragten anhand der Auseinandersetzung mit einer wissenschaftlichen Kontroverse im Unterrichtskontext auch Merkmale bzw. Eigenschaften physikalischer Modelle und die Arbeit mit diesen hervorheben (z. B. „*Eine Naturwissenschaft arbeitet mit Modellen (auch math. Natur)*“, L2F1).

Daneben werden auch Aspekte der *Rolle der Mathematik* (*NV2*) in der Physik als Naturwissenschaft thematisiert, zum Beispiel die Verwendung von Gleichungen als Beleg oder Begründung von Aussagen („$m = \gamma m_0$ *- lässt sich aus den Postulaten herleiten*“, L19F3). Auch die *Rolle von Experimenten/Beobachtungen* (*NV3*) in der Physik als Naturwissenschaft, insbesondere im

Hinblick auf die empirischen Fundierung wissenschaftlicher Erkenntnisse, ist in den Äußerungen der Studienteilnehmenden von Bedeutung: „*Nachweis über Experimente nötig, um eine Theorie zu stützen*" (L2F1). Dabei wird teilweise auch auf den Interpretationsprozess bei der Analyse von Daten und Gleichungen eingegangen. Aussagen, wie

> *untersch. Interpretation von phy. Phänomenen* (L23F4) oder

> *Letztlich geht es um die Interpretation des Produktes γm_0 als Masse. Je nach dem nimmt die Masse zu oder eben nur γ.* (L26F4),

deuten auf die Subjektivität wissenschaftlichen Wissens (*NV4*), insbesondere auf die Möglichkeit unterschiedlicher Interpretationen des gleichen Sachverhalts, hin.

Die Befragten nutzen die wissenschaftliche Kontroverse auch, um Skeptizismus bzw. eine kritische Haltung (*NV9*) im Sinne einer Grundeinstellung wissenschaftlichen Arbeitens und Denkens zu thematisieren und zu fördern:

> *ihnen so die Möglichkeit bieten, sich kritisch mit einem wissenschaftl. Inhalt auseinanderzusetzen.* (S9B1)

> *Schüler sollen durchaus erkennen, dass nicht alles in „Stein gemeißelt" und immer gleich gesehen werden muss und du Autoritäten [UNLESERLICH] durch kritische Auseinandersetzung durchaus in Frage gestellt werden kann und im Kantschen Sinne Aufklärung durch „Anstrengung des eigenen Geistes" und „eigenes Urteil" notwendig ist* (L14F3)

Insgesamt zeigt sich, dass von den Befragten verschiedene *Nature-of-Science*-Aspekte im Unterrichtskontext thematisiert werden. Vor allem die *Kontroversität* wissenschaftlicher Aushandlungsprozesse (*NV5*) sowie die fortwährende *Entwicklung* (*NV7.2*) und bestehende *Vorläufigkeit* (*NV7.1*) wissenschaftlichen Wissens wird dabei beleuchtet.

8.4 Typenbildung

8.4.1 Merkmalsraum

Wissenschaftliche Kontroversen besitzen für den Physikunterricht einen besonderen Bildungswert, dessen Umsetzung wesentlich von der Gestaltung des jeweiligen Unterrichts abhängig sein wird. Inwiefern dieses Potenzial vor allem in den Bereichen Erkenntnisgewinnungskompetenz (*Nature of Science*) oder Kommunikationskompetenz (z. B. Diskussion und Argumentation) genutzt werden kann, wird damit auch im Zusammenhang mit dem konkreten Vorgehen der Lehrenden bei der Realisierung des Physikunterrichts stehen. Zwischen den Studienteilnehmenden zeigen sich hinsichtlich dessen Unterschiede, die mit Hilfe der hier dargestellten Typenbildung systematisch erfasst werden sollen. Bei der Konstruktion der Typen, wie sie methodisch bereits in Kapitel 5.4 (ab S. 160) beschrieben wurde, konnten insgesamt 24 Physiklehrkräfte und 19 Physiklehramtsstudierende mit möglichst vollständigen Datensätzen berücksichtigt werden. Die Auswahl der für die Typenbildung grundlegenden Merkmale orientiert sich am Forschungsziel der Arbeit, zu untersuchen, inwiefern (angehende) Physiklehrkräfte den Bildungswert wissenschaftlicher Kontroversen nutzen (siehe Kapitel 4.1, S. 141). Diesbezüglich konnten drei besonders bedeutsame Merkmale identifiziert werden mit deren Hilfe ein dreidimensionaler Merkmalsraum zur Bildung und Verortung der Typen aufgespannt werden kann. Die Typenbildung erfolgte durch Reduktion (vgl. Kuckartz 2016, S. 149 f.) auf Basis der im Rahmen der inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse gewonnenen Kategorien zu den Handlungsintentionen (Kategoriensystem *I*) und -möglichkeiten (Kategoriensystem *H*) im Unterrichtskontext.

Wie in Kapitel 2.4.1 (ab S. 67) des Theorieteils dargelegt, sind einige unterrichtliche Prinzipien und Aspekte maßgebend für die Kontroversität des Unterrichts. Hierzu gehören insbesondere die Berücksichtigung von Multiperspektivität und des Kontroversitätsprinzips sowie Möglichkeiten zum Diskutieren und Argumentieren im Unterricht, um beispielsweise die Kommunikationskompetenz der Lernenden zu fördern. Die genannten Gesichtspunkte finden sich in Form der Kategorien *m(v) als kontrovers behandeln* und *Diskutieren/Positionieren fördern* auch als empirisch bedeutsam wieder und bestimmen entscheidend das Merkmal der *Kontroversität* des Unterrichts. Dementsprechend bildet die *Kontroversität* eines der drei Unterscheidungsmerkmale der gebildeten Typen. Das Merkmal beschreibt, ob Kontroversität, Diskussions- bzw. Positionierungsmöglichkeiten für Schüler im Unterrichtskontext (entsprechend der genannten Handlungsmöglichkeiten oder -intentionen) vorgesehen sind. Gemäß einer Typenbildung durch Reduktion wurden die in Tabelle 8.4 (S. 226) angegebenen Kategorien zur Konstruktion des Merkmals *Kontroversität* und seiner Ausprägungen

- *ja*: Thema wird als kontrovers behandelt oder das Diskutieren bzw. Positionieren der Schüler gefördert
- *nein*: keine Hinweise auf eine kontroverse Behandlung des Themas oder die Förderung von Diskussionen bzw. Positionierungen der Schüler

zusammengefasst.

Tabelle 8.4: Definition der Merkmalsausprägungen

Merkmal und Ausprägung		Codierungen in den Kategorien		
		Bezeichnung der Kategorien	Handlungs-intentionen	Handlungs-möglichkeiten
Kontroversität	ja	*m(v) als kontrovers behandeln*	*IZ3, IU8*	*HU7, HF4*
		Diskutieren/Positionieren fördern	*IZ4, IU9*	*HU8, HF5*
	nein	es sind keine Codierungen in den obigen Kategorien vorhanden		
Nature of Science	ja	*NoS-Aspekte thematisieren*	*IU10*	*HU9, HF6*
	nein	es sind keine Codierungen in den obigen Kategorien vorhanden		
eigene Position	ja	*Pro m(v) vermitteln*	*IZ2, IU3*	*HU3, HF1*
		Anti m(v) vermitteln	*IU4*	*HU4*
	nein	es sind keine Codierungen in den obigen Kategorien vorhanden		

Neben der Kommunikationskompetenz liegt ein weiterer Schwerpunkt des Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen im Bereich der Erkenntnisgewinnungskompetenz. Hierbei sind vor allem Lerngelegenheiten zur Vermittlung von *Nature-of-Science*-Aspekten von Bedeutung (siehe Kapitel 2.4.1, ab S. 67). Inwieweit die Befragten im Unterrichtskontext solche Gelegenheiten zur Thematisierung von *Nature-of-Science*-Aspekten nutzen bzw. nutzen wollen (entsprechend der genannten Handlungsmöglichkeiten oder -intentionen), kann mithilfe der Kategorien *NoS-Aspekte thematisieren* erfasst werden. Damit kann anhand der in Tabelle 8.4 aufgeführten Kategorien das Unterscheidungsmerkmal *Nature of Science* mit den folgenden beiden Merkmalsausprägungen definiert werden:

- *ja*: *Nature-of-Science*-Aspekte werden thematisiert
- *nein*: *Nature-of-Science*-Aspekte werden nicht thematisiert

Zusätzlich zu den beiden obigen Merkmalen *Kontroversität* und *Nature of Science*, die direkt im Zusammenhang mit der Nutzung des Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen im Physikunterricht stehen, ist für die konkrete Darstellung des Inhalts im Unterricht relevant, ob Lehrkräfte eine neutrale Haltung einnehmen oder eine *eigene Position* vertreten und vermitteln (siehe dazu auch Kapitel 2.4.1, ab S. 67). Die Frage nach dem Standpunkt der Lehrenden im Unterricht differenziert den Aspekt der Kontroversität und Multiperspektivität dieses Unterrichts weiter aus, so dass die *eigene Position* der Lehrenden im Unterrichtskontext als weiteres Unterscheidungsmerkmal für die Typenbildung herangezogen werden kann. Das Merkmal *eigene Position* ergänzt den Merkmalsraum um eine dritte Dimension, die Auskunft über die Positionierung der Befragten im Unterrichtskontext (entsprechend der genannten Handlungsmöglichkeiten oder -intentionen) gibt. Dabei können die beiden Merkmalsausprägungen

- *ja*: es wird eine Position vertreten
- *nein*: keine Position wird vertreten

mithilfe der Kategorien *Pro m(v) vermitteln* und *Anti m(v) vermitteln* unterschieden werden (siehe Tabelle 8.4, S. 226). Liegt keine Codierung in einer der beiden Kategorien vor (Ausprägung *nein*), können die Befragten zunächst als neutral in Bezug auf die kontroversen Positionen betrachtet werden.

Damit kann insgesamt ein dreidimensionaler Merkmalsraum konstruiert werden, wie er in Abbildung 8.19 dargestellt wird. Die Verortung der Befragten entsprechend der drei Unterscheidungskriterien im Merkmalsraum ermöglicht die Bildung von fünf verschiedenen Typen, die im nächsten Kapitel beschrieben werden.

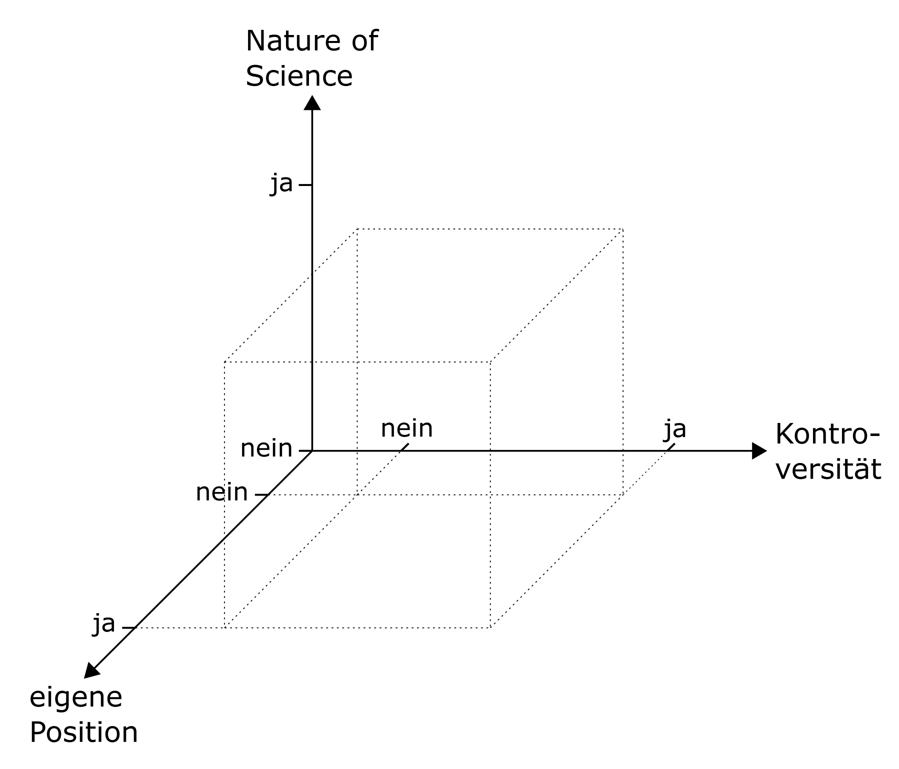


Abbildung 8.19: dreidimensionaler Merkmalsraum

8.4.2 Beschreibung der Typologie

In diesem Abschnitt werden die gebildeten Typen mithilfe ihrer Merkmalsausprägungen im Merkmalsraum und durch repräsentative Einzelfallinterpretationen beschrieben. Entsprechend des dreidimensionalen Merkmalsraumes konnten die Befragten zu den folgenden fünf verschiedenen Typen gruppiert werden:

Typ I: monoperspektivisch

Typ IIa: kontrovers und positioniert

Typ IIb: kontrovers und neutral

Typ IIIa: reflexiv und positioniert

Typ IIIb: reflexiv und neutral

Abbildung 8.20 zeigt die Verortung der Typen im Merkmalsraum.

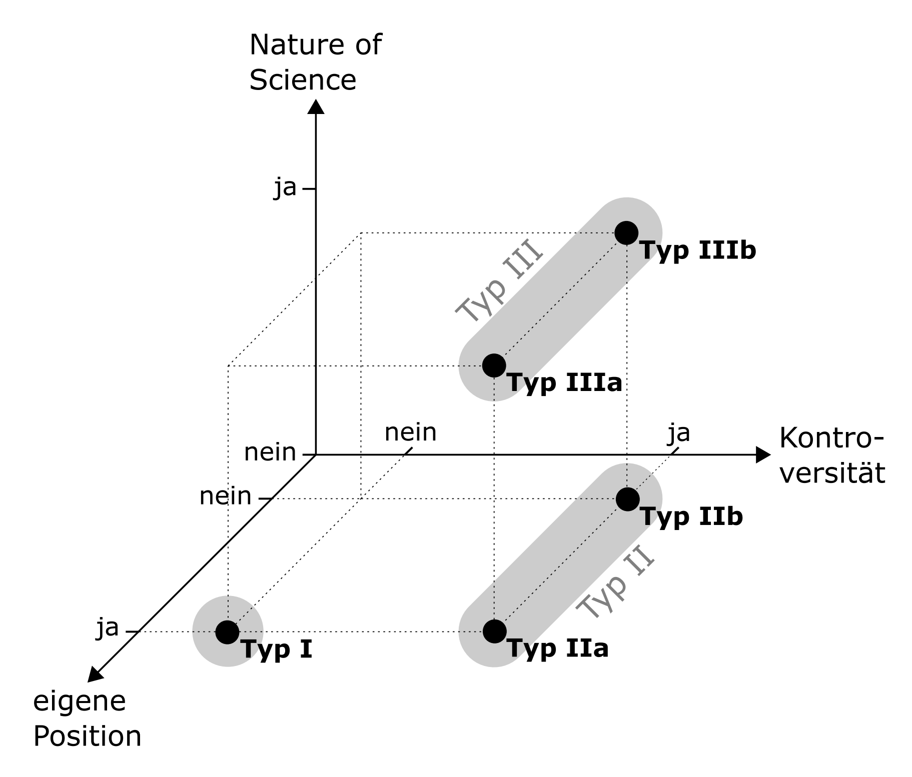


Abbildung 8.20: Unterscheidung der fünf Typen im dreidimensionalen Merkmalsraum

Typ I: monoperspektivisch

Angehörige dieses Typs behalten Ihre fachliche Position (konkret: die Pro-Ansicht, da die Anti-Ansicht bei keinem der eingeordneten Befragten vorkommt) auch im Unterrichtskontext bei. Dabei intendieren Sie diese Position als Ziel für den Unterricht oder drücken aus, diese (ihre) Position im Unterricht zu vertreten bzw. zu vermitteln. Kontroversität im Sinne der Behandlung der Thematik als Kontroverse (z. B. auch Offenheit in Bezug auf die verschiedenen fachlichen Standpunkte, Thematisierung von Problemen, Multiperspektivität) ist weder als Ziel noch als Möglichkeit für den Unterricht vorgesehen. Dass Schüler im Unterricht selbst zu der kontroversen Problematik diskutieren bzw. argumentieren oder sich positionieren sollen, wird nicht in Betracht gezogen. Insofern besteht eine monoperspektivische Darstellung und Auseinandersetzung mit der Thematik im Unterricht. *Nature-of-Science*-Aspekte werden nicht als Ziel oder im Rahmen von Handlungsmöglichkeiten im Unterricht thematisiert. Die nachstehende repräsentative Einzelfallinterpretation soll die Beschreibung der Charakteristika dieses Typs exemplarisch verdeutlichen.

repräsentative Fallinterpretation: die Lehrerin L5F1

Die Lehrerin L5F1 positioniert sich bei der Auseinandersetzung mit der wissenschaftlichen Kontroverse zur Relativität der Masse anhand der Textmaterialien bereits sehr stark zu Gunsten der Pro-Ansicht (Ansatz 1). Dies zeigt sich einerseits in einer klaren Befürwortung der Pro-Ansicht („*Begriff d. relativistischen Masse ist plausibel und beweisbar*"), andererseits aber auch in eher ablehnenden Reaktionen auf die Anti-Ansicht, wie zum Beispiel: „*ich bin mit dem Text unter der Quelle nicht einverstanden*" oder „*Das würde ich keinesfalls im Unterricht einsetzen.*" In der Angabe der Lernziele wird von L5F1 festgehalten: „*Schüler sollen Relativität der Masse kennen (wie es der Lehrplan vorschreibt)*". Da L5F1 keine weiteren Ziele formuliert, wird die Fokussierung auf die Pro-Ansicht im Unterricht trotz des eigenen Wissens um die Anti-Ansicht klar herausgestellt. Es entsteht der Eindruck, dass im Sinne einer Komplexitätsreduktion Kontroversität bzw. die Thematisierung eines anderen Ansatzes, einer anderen Position, wie die der Anti-Ansicht, vermieden werden soll, wie die folgenden beiden Zitate illustrieren:

> *Ich würde der Kollegin empfehlen sich nicht irritieren zu lassen und weiter über die geschwindigkeitsabhängige Masse sprechen, so wie es im Lehrbuch steht.*
>
> *Ich würde solche unangenehme Situationen im Vorfeld ausschließen durch Absprache mit meinen Kollegen und es gar nicht erst zu so unterschiedlichen Meinungen kommen lassen.*

L5F1 macht deutlich, dass im Unterricht die Diskussion der verschiedenen Ansätze („*Ich würde mich auf keine Diskussion einlassen.*") sowie ein multiperspektivischer Zugang zum eigentlich kontroversen Thema („*mich auf solche Probleme nicht einlassen*") nicht erwünscht ist. Ursache hierfür könnte die Ansicht sein, dass die Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Kontroversen im Physikunterricht zu anspruchsvoll für Schüler ist und daher nicht als Aufgabe der schulischen Bildung gesehen wird, wie die folgenden Äußerungen vermuten lassen:

> *Es mag ja sein, dass es andere Meinungen dazu gibt.*
> *Wir sind aber in der Schule und bilden keine Physikstudenten aus.*
> *Die Schule vereinfacht immer bestimmte Annahmen in der Ph – wer mehr wissen möchte solle Ph studieren*

Typ IIa: kontrovers und positioniert

Wie in Typ I behalten Angehörige dieses Typs Ihre fachliche Position auch im Unterrichtskontext bei und intendieren diese als Ziel für den Unterricht oder drücken aus, diese (ihre) Position im Unterricht zu vertreten bzw. zu vermitteln. Zum einen kann Kontroversität im Sinne der Behandlung der Thematik als Kontroverse (z. B. Offenheit in Bezug auf die verschiedenen fachlichen Standpunkte, Thematisierung von Problemen, Multiperspektivität) eine Zielstellung oder Möglichkeit für den Unterricht sein. Zum anderen wird teilweise in Betracht gezogen, dass Schüler im Unterricht selbst zu der kontroversen Problematik diskutieren bzw. argumentieren oder sich positionieren. Damit besteht eine (zumindest in Ansätzen) kontroverse Darstellung und Auseinandersetzung mit der Thematik im Unterricht vor dem Hintergrund

der Positionierung des Lehrenden für einen konkreten Ansatz bzw. Standpunkt. Auch hier werden *Nature-of-Science*-Aspekte nicht als Ziel oder im Rahmen von Handlungsmöglichkeiten im Unterricht thematisiert. Die folgende repräsentative Einzelfallinterpretation beschreibt diese Charakteristika des Typs IIa exemplarisch.

repräsentative Fallinterpretation: der Lehrer L23F4

Die Antworten in den Fragebogen 1 und 2 zeigen für L23F4 deutlich, dass sowohl vor als auch nach der Auseinandersetzung mit den Textmaterialien zur wissenschaftlichen Kontroverse um die Relativität der Masse Ansatz 1 (Pro-Ansicht) der eigenen Fachposition von L23F4 entspricht. Die Konfrontation mit den beiden unterschiedlichen Positionen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse scheint jedoch einen Reflexionsprozess zu initiieren. So äußert sich L23F4 durchaus offen gegenüber der Anti-Position („*ich glaube, meine Schüler würden mir auch diese Logik abnehmen*") und ist bereit seinen eigenen Unterricht hinsichtlich der Darstellung dieses Fachinhaltes kritisch zu analysieren („*Fehlvorstellungen auch in meinem UR möglich*"). Zwar gibt L23F4 bei den Lernzielen eindeutig an, dass im Unterricht die Pro-Ansicht vermittelt werden soll (z. B. „*die Schüler können die Rel. der Masse erklären*"), dennoch spricht er sich bereits im Vorfeld in den Gedankenlisten auch für einen Unterricht aus, der die Kontroversität des Themas berücksichtigt: „*ich sollte im UR kritisch beide Interpretationen (!) ansprechen*". Diese Intention entspricht dann auch den Vorschlägen zum Vorgehen im Unterricht. Hier beschreibt L23F4 die Möglichkeit eines multiperspektivischen Zugangs, der die unterschiedlichen Fachpositionen beleuchtet („*beide Varianten können besprochen werden*"). Auch einer Diskussion der verschiedenen Ansätze gegenüber zeigt sich L23F4 aufgeschlossen („*Diskussion (untersch. Interpretation von phy. Phänomenen)*"). Trotz der damit angestrebten Kontroversität im Unterricht, vertritt L23F4 gegenüber den Schüler im Unterricht auch seinen eigenen fachlichen Standpunkt, wie die folgende Bemerkung in Reaktion auf die Thematisierung beider Fachpositionen durch Schüler (Textvignette 2B) zeigt: „*meine Meinung → rel. Masse → mit Begründung → Exp. → Theorie*". Die eigene Meinung wird dabei nicht als Widerspruch zur Behandlung der unterschiedlichen kontroversen Positionen betrachtet, da akzeptiert wird, dass „*mehrere Interpretationen möglich*" sind.

Typ IIb: kontrovers und neutral

Angehörige dieses Typs vertreten bzw. vermitteln im Unterrichtskontext keine ausgewählte Fachposition (weder alleinig die Pro- noch die Anti-Ansicht). Kontroversität kann im Sinne von Offenheit in Bezug auf die verschiedenen fachlichen Standpunkte, die Thematisierung von Problemen eines Ansatzes oder Multiperspektivität eine Zielstellung bzw. Möglichkeit für den Unterricht sein. Daneben wird zum Teil auch in Betracht gezogen, dass Schüler im Unterricht selbst zu der kontroversen Problematik diskutieren, argumentieren oder sich positionieren. Somit wird (zumindest in Ansätzen) eine kontroverse Darstellung und Auseinandersetzung mit der Thematik im Unterricht vor dem Hintergrund keiner erkennbaren Positionierung des Lehrenden für einen konkreten Ansatz bzw. Standpunkt (Neutralität) verfolgt. Wie bei den Typen I und IIa werden *Nature-of-Science*-Aspekte nicht als Ziel oder im Rahmen von Handlungsmöglichkeiten im Unterricht thematisiert. Die Charakteristika dieses Typs werden in der untenstehenden repräsentative Einzelfallinterpretation exemplarisch verdeutlicht.

repräsentative Fallinterpretation: die Lehramtsstudentin S9B1

Die Studentin S9B1 zeigt sich bei der Konfrontation mit den beiden gegensätzlichen Positionen zur wissenschaftlichen Kontroverse um die Relativität der Masse durchaus offen für die Argumente beider Seiten. Sie analysiert und reflektiert die verschiedenen Positionen, ohne selbst einen endgültigen Standpunkt einnehmen zu wollen, wie das folgende Zitat zeigt:

> *Nach dem Lesen der bisherigen Materialien würde ich mich damit vorher definitiv noch genauer auseinandersetzen, um die angesprochenen Widersprüche etc. zu durchdenken.*

Die Unsicherheit bzw. Unentschiedenheit in Bezug auf eine eigene fachliche Positionierung spiegelt sich auch in der Begründung des fachlichen Standpunktes im Fragebogen 2 wider:

> *Ich denke aus den Gedankenlisten wird deutlich, dass ich mittlerweile mehr als verwirrt bin. Ich würde zwar eher zu „falsch" tendieren, aber eine Festlegung habe ich nicht.*

Kohärent zur eigenen Unentschlossenheit bei der Entscheidung für einen der beiden Ansätze formuliert S9B1 daher als Ziel für den Unterricht nicht, dass eine bestimmte Position vermittelt werden soll, sondern:

> *Die SuS sollen anhand des Stundenthemas das Prinzip einer wissenschaftl. Debatte kennenlernen.*
> *… sollen erkennen, dass mit „die Masse" als Konstrukt verschiedene Auslegungen gemeint sein können.*

Ursache dafür, dass S9B1 keine eigene Position im Unterricht vertritt, ist aller Wahrscheinlichkeit nach die Tatsache, dass bei ihr selbst keine eindeutige Präferenz für einen der beiden Ansätze vorliegt. Die Entscheidung für eine insofern neutrale Darstellung der Kontroverse im Unterricht ist also nicht zwangsläufig mit der Befürchtung verknüpft, die eigene Meinung des Lehrenden könnte die Schüler zu sehr beeinflussen. Stattdessen ist Neutralität in diesem Fall bedingt durch die Unentschiedenheit der Lehramtsstudentin: Wer selbst keine sichere Fachmeinung besitzt, kann eine solche auch nicht im Unterricht vertreten.

Daneben ist für S9B1 ein multiperspektivischer („*Ich würde den Schülern aber beide Ansichten näher bringen*"), kontroversitätsorientierter Zugang zur Thematik im Unterricht sowie eine prinzipiell offene Haltung gegenüber unterschiedlichen Meinungen wichtig, wie die folgende Äußerung belegt:

> *Ich würde zunächst sagen, dass ich sehr froh bin, dass genau diese Situation eingetreten ist. So fühlen sich beide SuS zunächst nicht „in die Ecke gedrängt". Dann würde ich die Frage in die Klasse geben, wer welche Rechercheergebnisse gefunden hat und auch ihre Quellen. Daraus lässt sich dann gut die Komplexität des Themas und die gegenwärtige Situation beschreiben. Im Anschluss sollen die SuS mit Argumenten begründet eine „präferierte" Ansicht wählen.*

Diese Intention für die Umsetzung im Unterricht zeichnet sich bereits in den Gedankenlisten während der eigenen fachlichen Auseinandersetzung mit der wissenschaftlichen Kontroverse ab:

> *Es wäre aber definitiv zu überlegen, dieses Thema als Diskussionsgrundlage zu nutzen und das Arbeiten mit verschiedenen Textmaterialien zu üben. Im Sinne einer Debatte könnten die SuS in Gruppen über die vers. Ansichten sprechen.*

Sicherlich ist diese Zielstellung auch darauf zurückzuführen, dass S9B1 während der eigenen Beschäftigung mit der Thematik (Lesen der Textmaterialien) das Bestehen einer Kontroverse feststellt (*Offensichtlich ist der Diskurs hier noch nicht abgeschlossen.*) und die Situation entsprechend einordnet. Dadurch besteht bei S9B1 auch im Unterrichtskontext die Bereitschaft zum Diskutieren der gegensätzlichen Standpunkte (z. B. „*Ich würde die Diskussion aufgreifen*“).

Typ IIIa: reflexiv und positioniert

Wie bei den Typen I und IIa behalten Angehörige dieses Typs Ihre fachliche Position auch im Unterrichtskontext bei und intendieren diese als Ziel für den Unterricht oder drücken aus, diese (ihre) Position im Unterricht zu vertreten bzw. zu vermitteln. Die Behandlung der Thematik als Kontroverse (z. B. Offenheit in Bezug auf die verschiedenen fachlichen Standpunkte, Thematisierung von Problemen, Multiperspektivität) kann in dieser Gruppe eine Zielstellung oder Möglichkeit für den Unterricht sein. Schüler sollen im Unterricht teilweise selbst zu der kontroversen Problematik diskutieren und argumentieren oder sich positionieren können. Im Unterschied zu den vorangestellten Typen I und II werden *Nature-of-Science*-Aspekte als Ziel oder im Rahmen von Handlungsmöglichkeiten im Unterricht thematisiert. Insgesamt wird damit eine reflexive Darstellung und Auseinandersetzung mit der Thematik im Unterricht vor dem Hintergrund einer Positionierung des Lehrenden für einen konkreten Ansatz bzw. Standpunkt angestrebt. Beispielhaft werden diese Charakteristika des Typs IIIa in der folgenden repräsentative Einzelfallinterpretation dargestellt.

repräsentative Fallinterpretation: der Lehramtsstudent S6B1

In der Auseinandersetzung mit den verschiedenen Textmaterialien zur wissenschaftlichen Kontroverse um die Relativität der Masse zeigt sich bei S6B1 bereits eine klare Positionierung für Ansatz 1 (Pro-Ansicht). Während dieser befürwortet wird („*Pro-Ansicht sinnvoller*“), fallen die Reaktionen auf Ansatz 2 eher negativ aus („*Anti-Ansicht erscheint vollkommen unlogisch*“). Dieser fachliche Standpunkt spiegelt sich daran anknüpfend auch in den Lernzielen wider, die S6B1 im Unterricht verfolgt: „*Kennen den Begriff der relativistischen Masse und können diesen von der Ruhemasse abgrenzen*“. Für die konkrete Unterrichtsgestaltung hebt S6B1 hervor, dass der Lehrende seine eigene Fachposition vertreten kann, diese aber gegenüber den Schülern begründen sollte: „*man nimmt als Lehrer selbst vorher eine Position ein und vermittelt diese begründet (durch Beispiele/Experimente) den SuS*“. Diese Positionierung der Lehrkraft schließt jedoch nicht Multiperspektivität und einen diskursiven Zugang im Unterricht aus, wie das folgende Zitat von S6B1 illustriert:

> *Wenn es versch. Sichtweisen gibt, sollten beide besprochen werden. Dann kann man bei viel Zeit durch Diskussionen entscheiden, welche Sichtweise im Weiteren verfolgt wird [...]*

S6B1 verweist an verschiedenen Stellen auf die Möglichkeit, die unterschiedlichen fachlichen Standpunkte mit den Schülern zu diskutieren bzw. ihnen Gelegenheit zum Argumentieren zu geben:

> *Die SuS ihre Sichtweise begründen lassen (Recherche sollte tiefer gehen als nur die präsentierten Aussagen), dann Diskussion im Klassenverband*

Dabei schlägt S6B1 vor, dass sowohl der Lehrende seine eigene Position den Schülern darstellt, als auch die Schüler zu einem Standpunkt im Unterricht finden können („*Stellungnahme durch SuS/Lehrkraft*“). Bei der Reflexion der kontroversen Fachpositionen bezieht S6B1 auch *Nature-of-Science*-Aspekte ein, um den Schülern ein Verständnis für das Bestehen der wissenschaftlichen Kontroverse mit widerstreitenden fachwissenschaftlichen Aussagen zu ermöglichen. Konkret geht S6B1 dabei beispielsweise auf die Bedeutung von Theorie und Empirie in der Naturwissenschaft ein: „*Zur Natur von Physik (es gibt keine absolute Wahrheit, alles sind nur auf Beobachtungen gestützte Theorien)*“.

Typ IIIb: reflexiv und neutral

Wie die Angehörigen des Typs IIb vertreten bzw. vermitteln die diesem Typ zuzuordnenden Befragten keine ausgewählte Fachposition (weder alleinig die Pro- noch die Anti-Ansicht) im Unterrichtskontext. Zum einen kann Kontroversität im Sinne der Behandlung der Thematik als Kontroverse (z. B. Offenheit in Bezug auf die verschiedenen fachlichen Standpunkte, Thematisierung von Problemen, Multiperspektivität) eine Zielstellung oder Möglichkeit für den Unterricht sein. Zum anderen kann in Betracht gezogen werden, dass Schüler im Unterricht selbst zu der kontroversen Problematik diskutieren und argumentieren oder sich positionieren. So wie bei Typ IIIa werden auch von Angehörigen dieses Typs *Nature-of-Science*-Aspekte als Ziel oder im Rahmen von Handlungsmöglichkeiten im Unterricht thematisiert. Insofern wird eine reflexive Darstellung und Auseinandersetzung mit der Thematik im Unterricht vor dem Hintergrund keiner erkennbaren Positionierung des Lehrenden für einen konkreten Ansatz bzw. Standpunkt (Neutralität) verfolgt. Die folgende repräsentative Einzelfallinterpretation dient der exemplarischen Beschreibung der Charakteristika dieses Typs.

repräsentative Fallinterpretation: die Lehrerin L21F4

Die Konfrontation mit den kontroversen Fachpositionen (Lesen der Textmaterialien) mündet bei der Lehrerin L21F4 zum Teil in einem Konflikt mit dem bereits vorhandenem Wissen (z. B. „*jetzt bin ich verwirrt*“). Obwohl sie sich im Verlauf mitunter klar positioniert („*nach der Argumentation bin ich voll für rel. Masse*“), gibt sie bei der fachlichen Entscheidung hinsichtlich der Frage nach der Relativität der Masse in Fragebogen 2 an, unentschieden zu sein. Es ist naheliegend, dass Sie deshalb auch weder in den Lernzielen noch im Unterrichtskontext eine ausgewählte Position verfolgt. Im Gegenteil beschreibt L21F4 in Ihren Zielen für den Unterricht eine vor allem multiperspektivische Darstellung der Thematik und legt Wert auf Kommunikationskompetenz:

> *Die SuS kennen versch. Zugänge zum Massebegriff in der Physik.*
> *Die SuS können sich positionieren mit Hilfe von Argumenten für bzw. gegen die Invarianz der Masse.*

Damit formuliert sie Ziele, die konsistent zu der Begründung ihrer eigenen Unentschiedenheit bezüglich der fachwissenschaftlichen Entscheidung zu der Frage nach der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse sind. In dieser Begründung ihres Standpunktes schreibt L21F4:

> *Es scheint verschiedene Herangehensweisen an die Frage zu geben. Jede Seite hat Argumente, denen man folgen kann und die überzeugen. Warum muss man sich auch entscheiden müssen?*

Diese Akzeptanz von Kontroversität zeigt sich bei L21F4 bereits in den Gedankenlisten („*[...] warum soll nicht beides gelten?!*"). Hinzu kommt im Fall von L21F4 wahrscheinlich sogar ein persönliches Interesse aufgrund der Kontroversität des Themas, wie eine Bemerkung im Nachgang der Erhebung zeigt, die im Zuge der teilnehmenden Beobachtung erfasst werden konnte: „*Ich finde das auch gerade interessant, dass das nicht so schwarz und weiß ist.*" Passend dazu signalisiert L21F4 in den Unterrichtssituationen vor allem Offenheit gegenüber den unterschiedlichen Positionen („*Man sollte beide Schüler unterstützen [...]*") und äußert sich positiv im Hinblick auf das Vorliegen einer Kontroverse, wie die folgende Bemerkung zeigt: „*Ich würde den Schülern sagen, dass ich genau diese Situation toll finde.*". Zusätzlich zu dieser Aufgeschlossenheit in Bezug auf Kontroversität im Unterricht ermöglicht L21F4 reflexive Lerngelegenheiten zur Vermittlung von *Nature-of-Science*-Aspekten, indem sie die folgenden Fragen aufwirft:

> *Ich würde S1 fragen, ob neue Lehrbücher immer mehr Recht haben als ältere Bücher?! Und ob S3 immer eine feste Antwort auf alle Fragen hat?! Und ich würde alle Schüler fragen, ob sie denken, dass man alle Fragen der Natur irgendwann beantworten werden kann.*

Damit können beispielsweise die Vorläufigkeit und Grenzen wissenschaftlicher Erkenntnisse thematisiert werden, um entsprechend des Kompetenzbereichs Erkenntnisgewinnung Gesichtspunkte des Wesens der naturwissenschaftlichen Praxis zu diskutieren.

8.4.3 Zuordnung der Befragten zu den Typen und Analyse nach soziodemografischen Daten

Im Anschluss an die Beschreibung der Typen wurden alle Teilnehmenden der Studie mit möglichst vollständigen Datensätzen (24 Lehrkräfte und 19 Studierende) genau einem der fünf Typen zugeordnet. Abbildung 8.21 (S. 235) zeigt eine Gruppierung dieser Studienteilnehmenden entsprechend der Typen.

Eine Auswertung anhand der Einteilung in Typen soll zunächst bezugnehmend auf die drei Dimensionen *Kontroversität*, *Nature of Science* und *eigene Position* des Merkmalsraumes vorgenommen werden. Der überwiegende Teil der hier betrachteten Befragten (38 der 43 Befragten) wurde in den Typen II und III verortet. Das heißt, die deutliche Mehrheit dieser Studienteilnehmenden besitzt die Ausprägung *ja* für das Merkmal *Kontroversität* und verfolgt somit eine

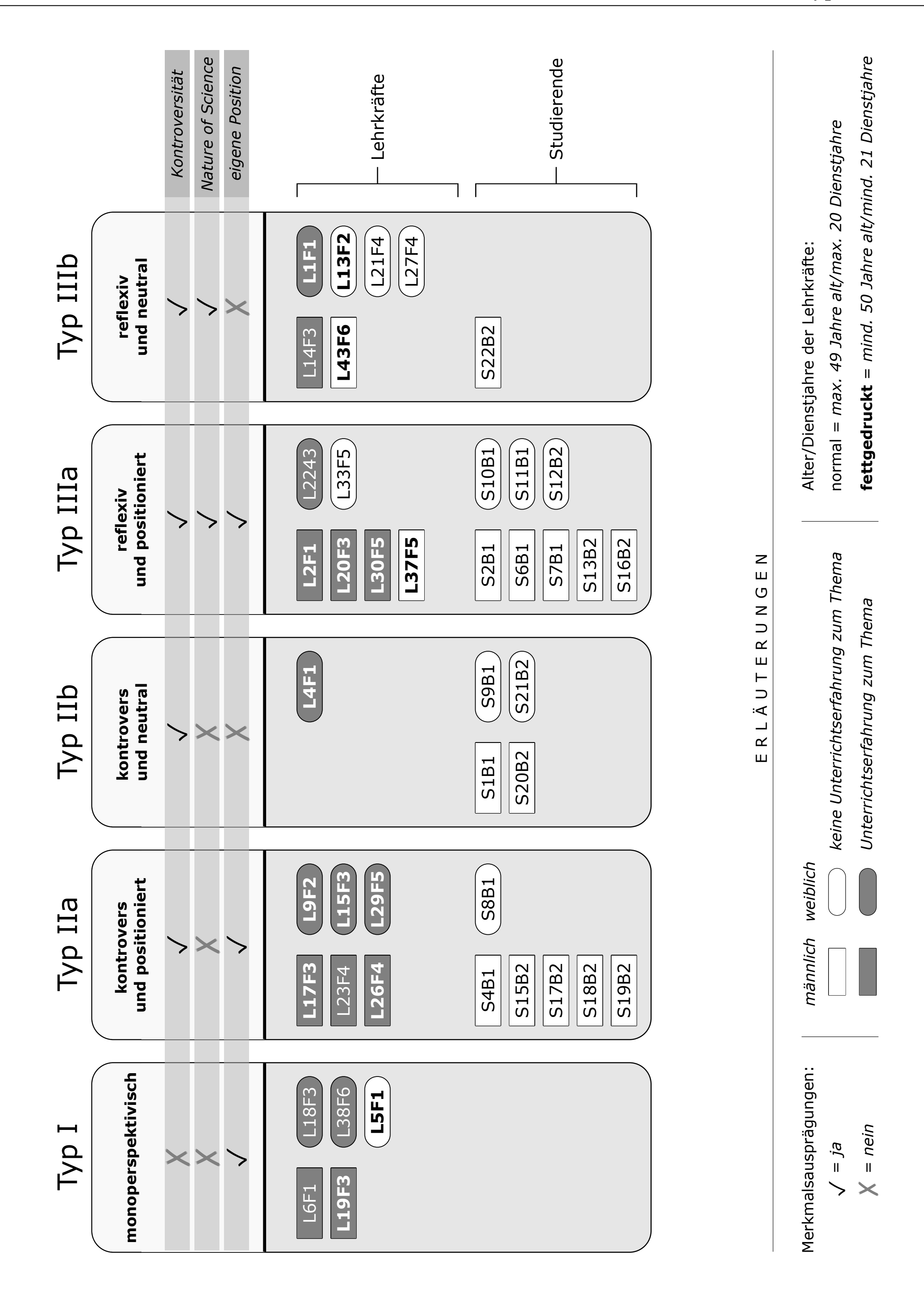


Abbildung 8.21: Zuordnung der Studienteilnehmenden mit möglichst vollständigen Datensätzen zu den Typen
(Alter und Dienstjahre sind für L6F1 und L14F3 nicht bekannt)

zumindest teilweise kontroverse Darstellung der Thematik im Unterricht oder ist an entsprechenden Diskussionsgelegenheiten interessiert. Typ I, bei dem diese Kontroversität im Unterricht nicht intendiert wird, kommt im Vergleich zu den anderen Typen eher selten vor. Etwa die Hälfte der zugeordneten Studienteilnehmenden (21 von 43 Befragten) konnte Typ III zugewiesen werden, was bedeutet, dass *Nature-of-Science*-Aspekte im Unterrichtskontext thematisiert werden sollen. Ein Großteil der Befragten (31 von 43 Befragten) verteilt sich auf die Typen I, IIa und IIIa, in denen die eigene fachwissenschaftliche Position des Lehrenden auch im Unterricht vertreten werden soll. Insgesamt zeigt sich, dass die Typen IIa und IIIa am häufigsten unter den Befragten vorkommen. Unter den Studienteilnehmenden, die *Kontroversität* im Unterrichtskontext anstreben, ist demnach auch häufiger zu erwarten, dass diese Befragten im Unterricht die eigene Fachposition vermitteln werden. Damit zeichnet sich mehr als die Hälfte der betrachteten Befragten dadurch aus, dass sie eine bestimmte Position der Kontroverse im Unterricht vertreten, während sie aber dennoch beide Positionen darstellen bzw. diskutieren möchten.

Nachstehend werden die gebildeten Typen im Zusammenhang mit den folgenden soziodemografische Daten (siehe Fragebogen 1) der Studienteilnehmenden analysiert:

- Geschlecht
- Gruppenzugehörigkeit: Lehrkräfte und Studierende
- Alter bzw. Dienstjahre
- Unterrichtserfahrung mit dem Thema *Spezielle Relativitätstheorie*

Geschlecht

Bei Betrachtung des Geschlechterverhältnisses innerhalb der jeweiligen Typen lassen sich keine bedeutsamen Unterschiede feststellen. Innerhalb des Typs IIa kann unter den Lehramtsstudierenden zwar lediglich eine Studentin gefunden werden. Da es allerdings insgesamt nur sechs Studentinnen gibt, ist auch von geringen Studentinnenzahlen je Typ auszugehen. Hinzu kommt, dass für den Typ IIa die Geschlechterverteilung der Lehrkräfte sehr ausgeglichen ist, so dass nicht von einer Auffälligkeit auszugehen ist. Damit sind keine Abhängigkeiten oder Zusammenhänge in Bezug auf das Geschlecht zu vermuten.

Gruppenzugehörigkeit: Lehrkräfte und Studierende

Im Vergleich der Typen I, II und III fällt auf, dass in Typ I ausschließlich Lehrkräfte verortet werden konnten, während in den anderen beiden Haupttypen sowohl Studierende als auch Lehrkräfte vorkommen. Dieses Ergebnis entspricht im Wesentlichen den Erkenntnissen der Auswertung der Gedankenlisten und der Handlungsmöglichkeiten im Unterrichtskontext. Hier zeigten sich Hinweise darauf, dass gegenüber den Lehrkräften Studierende möglicherweise häufiger offen für Aspekte von Kontroversität und die Förderung von Diskussionsgelegenheiten im Physikunterricht sind.

Alter bzw. Dienstjahre

Die Analyse der beiden in Abbildung 8.21 (S. 235) dargestellten Altersgruppen der Lehrkräfte ergibt keine auffälligen Unterschiede. In den verschiedenen Gruppen der Typen können prinzipiell beide Altersgruppen bei den Lehrkräften vorgefunden werden. Bei Typ IIa zeigt sich ein hoher Anteil älterer Lehrkräfte. Allerdings ist der relative Anteil der Lehrkräfte, die mindestens 50 Jahre alt sind, auch insgesamt betrachtet deutlich höher als der Anteil der Lehrkräfte unter 50 Jahren, so dass aufgrund der kleinen Anzahl der Lehrkräfte des Typs IIa keine Rückschlüsse auf Besonderheiten in der Altersverteilung gezogen werden können.

Unterrichtserfahrung mit dem Thema *Spezielle Relativitätstheorie*

Fast alle Lehrkräfte (bis auf L5F1), die noch nicht über Unterrichtserfahrung zur Thematik der Spezielle Relativitätstheorie verfügen, wurden Typ III zugeordnet, welcher sich im Merkmal *Nature of Science* von den anderen beiden Haupttypen unterscheidet. Angehörige des Typs III nutzen (bzw. intendieren) demnach Gelegenheiten zur Thematisierung von *Nature-of-Science*-Aspekten im Unterrichtskontext. Aus der Analyse der Typen hinsichtlich der Unterrichtsvorerfahrung ließe sich damit die Vermutung aufstellen, dass Lehrkräfte womöglich eher die Nutzung von *Nature-of-Science*-Lerngelegenheiten im Zusammenhang mit einer wissenschaftlichen Kontroverse im Physikunterricht in Betracht ziehen, wenn sie noch nicht über entsprechende themenspezifische Unterrichtserfahrungen (solche ohne Kontroversität) verfügen. Dieser Zusammenhang wäre insofern plausibel, als dass Lehrkräfte mit Unterrichtserfahrung eher auf bereits bestehende Vorstellungen und Planungsentscheidungen zur Unterrichtsgestaltung, ohne Berücksichtigung von *Nature of Science* im Zusammenhang mit Kontroversität, zurückgreifen werden als Lehrkräfte ohne diese Vorerfahrungen.

Zusammenfassend betrachtet können im Hinblick auf die Nutzung des Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen Unterschiede zwischen den einzelnen Typen festgestellt werden. Die klare Mehrheit der hier betrachteten Studienteilnehmenden zeigt Ansätze zur Umsetzung von Kontroversität im Unterricht. Dabei vertritt ein Großteil derer eine eigene fachwissenschaftliche Position vor den Schülern. Unter denjenigen, die im Unterricht nicht auf die Kontroversität des Themas eingehen (Typ I), befinden sich ausschließlich Lehrkräfte, aber keine Studierenden. Immerhin etwa die Hälfte der Befragten nutzt die wissenschaftliche Kontroverse im Unterricht zur Thematisierung von *Nature-of-Science*-Aspekten bzw. intendiert dies. Dabei könnte es vorteilhaft für die Bereitschaft der Lehrenden sein, *Nature-of-Science*-Lerngelegenheiten im Zusammenhang mit einer wissenschaftlichen Kontroverse im Physikunterricht zu nutzen, wenn noch keine themenspezifischen Unterrichtsvorerfahrungen vorhanden sind.

III ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION

9 Zusammenfassung

9.1 Zusammenfassung des theoretischen Teils

Wissenschaftliche Kontroversen sind in den Naturwissenschaften untrennbar mit dem Prozess der Erkenntnisgewinnung verknüpft. Sie besitzen für den Physikunterricht einen besonderen Bildungswert, indem sie einen Beitrag zur *Scientific Literacy* der Schüler leisten können, um diese zu gesellschaftlicher Teilhabe und kritischer Urteilsbildung zu befähigen. Um die Bedeutung wissenschaftlicher Kontroversen für die Naturwissenschaften und damit auch für den naturwissenschaftlichen Unterricht genauer erfassen zu können, wurde in der vorliegenden Arbeit zunächst geklärt, was unter einer wissenschaftlichen Kontroverse verstanden werden kann. Hierbei konnten die folgenden sieben Merkmale zur Charakterisierung einer wissenschaftliche Kontroverse identifiziert werden (siehe Kapitel 2.1, ab S. 7):

(1) verschiedene, miteinander unvereinbare Positionen

(2) argumentativer, kritischer Diskurs

(3) öffentlicher Diskurs

(4) Relevanz für eine bestimmte Personengruppe

(5) Unauflösbarkeit des Konflikts

(6) Einfluss grundlegender Voraussetzungen oder Annahmen

(7) Subjektivität

Dabei werden unter dem Begriff *wissenschaftliche Kontroverse* ausschließlich innerfachlich strittige wissenschaftliche Positionen, die möglichst frei von außerdisziplinären Aspekten (z. B. aus Politik, Gesellschaft, Wirtschaft, Umwelt, Medizin oder Ethik) sind, subsumiert.

Der Bildungswert wissenschaftlicher Kontroversen liegt schwerpunktmäßig in den beiden Bereichen Kommunikationskompetenz und Erkenntnisgewinnungskompetenz, zu der insbesondere die Vermittlung angemessener *Nature-of-Science*-Vorstellungen zählt (siehe Kapitel 2.2, ab S. 34). Um den Zusammenhang wissenschaftlicher Kontroversen mit *Nature-of-Science*-Aspekten konkret zu erfassen, wurden in der fachdidaktischen Forschung etablierte Beschreibungen durch Lederman et al. (2002), McComas und Olson (1998), Osborne et al. (2003) und Allchin (2011) herangezogen. Dabei konnten zum Teil starke Zusammenhänge zwischen *Nature-of-Science*-Aspekten und wissenschaftlichen Kontroversen aufgezeigt werden (siehe Kapitel 2.3.1), womit ein Potenzial wissenschaftlicher Kontroversen zur Nutzung als *Nature-of-Science*-Lerngelegenheit für den Physikunterricht einhergeht. Bisher konnte die empirische fachdidaktische Forschung (siehe Kapitel 2.3.2, S. 54) hierzu zeigen, dass ...

... Schülervorstellungen zu *Nature of Science* für Aspekte im Zusammenhang mit Kontroversität in der Wissenschaft (z. B. die Bedeutung von Evidenz, die Interpretationsbedürftigkeit wissenschaftlicher Daten und soziale Einflussfaktoren in der Wissenschaft) häufig unangemessen sind,

... es Hinweise darauf gibt, dass die Qualität der Auseinandersetzung bzw. der Beurteilung kontroverser, wissenschaftsbezogener Problemstellungen vom *Nature-of-Science*- Verständnis der Schüler abhängig ist,

... kontroverse Themen mit Wissenschaftsbezug geeignet zu sein scheinen, wichtige *Nature-of-Science*-Aspekte thematisieren zu können.

Dementsprechend wäre es naheliegend wissenschaftliche Kontroversen im Unterricht als Lerngelegenheit zu nutzen, um defizitären *Nature-of-Science*-Vorstellungen zu begegnen. Dabei spielt wahrscheinlich auch das *Nature-of-Science*-Verständnis der Lehrkräfte eine Rolle im Umgang mit wissenschaftlichen Kontroversen. Diesbezüglich kann aufgrund empirischer Forschungsergebnisse (siehe Kapitel 2.3.3, S. 61) festgehalten werden, dass ...

... ein angemessenes *Nature-of-Science*-Verständnis der Lehrkräfte sowie Kompetenzen für die Darstellung von *Nature-of-Science*-Inhalten im Unterricht eine notwendige Voraussetzung gelingender Lerngelegenheiten im Bereich von *Nature of Science* sein dürften,

... auch das *Nature-of-Science*-Verständnis von Lehrkräften häufig Defizite aufweist,

... bei der Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Kontroversen *Nature-of-Science*-Aspekte von Lehrkräften thematisiert und reflektiert werden können.

Somit wird die Realisierung des Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen im Bereich von *Nature of Science* maßgeblich durch die jeweilige Lehrkraft bestimmt sein.

Weil die Nutzung des Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen auch von der Gestaltung des Unterrichts abhängig sein wird, sind mithilfe vorhandener Empfehlungen für den Umgang mit gesellschaftlich relevanten Kontroversen bzw. Socio-Scientific Issues didaktische Hinweise für die Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Kontroversen im naturwissenschaftlichen Unterricht formuliert worden. Hierzu werden in Kapitel 2.4.1 (ab S. 70) die folgenden sechs Gesichtspunkte für den Umgang mit kontroversen Themen im Unterricht genauer erläutert:

(1) Kontroversitätsprinzip und Multiperspektivität

(2) Diskutieren und Argumentieren

(3) Informationsklarheit gewinnen

(4) kritische Haltung

(5) Bewertungsstrukturwissen

(6) *Nature of Science* thematisieren

Hinsichtlich der Frage, wie Lehrkräfte der naturwissenschaftlichen Fächer im Unterricht (insbesondere im Physikunterricht) konkret mit wissenschaftlichen Kontroversen umgehen, liegen bisher kaum fachdidaktische Forschungsergebnisse vor. Die wenigen bekannten Erkenntnisse die hierzu bestehen, deuten jedoch daraufhin, dass Lehrkräfte Unterstützung bezüglich des Unterrichtens mit und über wissenschaftliche Kontroversen benötigen (vgl. Dunlop und Veneu 2019, S. 707).

Sehen sich Physiklehrende mit einer wissenschaftlichen Kontroverse konfrontiert, muss deren Relevanz für den Unterricht sowie die möglichen Darstellungsoptionen der zugehörigen Fachthematik im Unterricht beurteilt werden. Damit verbunden sind fachwissenschaftliche als auch fachdidaktische Urteils- und Entscheidungsvorgänge, für deren Analyse das Rahmenmodell für den Prozess des Entscheidens (vgl. Betsch, Funke und Plessner 2011, S. 75) herangezogen werden kann (siehe Kapitel 2.5, S. 84).

In Kapitel 3 (ab S. 87) dieser Arbeit wurde exemplarisch die wissenschaftliche Kontroverse um die Relativität der Masse dargestellt. Hierbei wurde zuerst allgemein beschrieben, welche verschiedenen Fachpositionen in der Physik hinsichtlich der Verwendung des Begriffs der sogenannten relativistischen Masse bestehen. Die wesentlichen Aussagen der beiden zugrundeliegenden Massekonzepte in der Speziellen Relativitätstheorie wurden gegenübergestellt, um einen Überblick zu den beiden fachwissenschaftlichen Standpunkten zu erhalten. Im Anschluss daran wurden die einzelnen Argumente und Diskussionspunkte dieser Positionen systematisch beleuchtet (siehe Kapitel 3.1.2, S. 101). Nach der Einordnung als wissenschaftliche Kontroverse (siehe Kapitel 3.2, S. 122) stand damit ein konkreter Untersuchungskontext für das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte empirische Forschungsvorhaben zur Verfügung. Da die Relativität der Masse auch Inhalt der Lehr- bzw. Bildungspläne einiger deutscher Bundesländer ist, werden in Kapitel 3.3 (ab S. 126) Leitideen zur Darstellung der Thematik im Schulunterricht vorgeschlagen.

9.2 Zusammenfassung des empirischen Teils

Zielsetzung und Design der Studie

Erkenntnisse zum Umgang von Lehrkräften der naturwissenschaftlichen Fächer mit wissenschaftlichen Kontroversen und der Nutzung des damit verbundenen Bildungswertes sind in der fachdidaktischen Forschung bisher kaum vorhanden. Speziell im Bereich der Physikdidaktik liegt hier ein Forschungsdesiderat vor, aus dem sich das übergeordnete Forschungsziel dieser Arbeit ergibt, zu untersuchen wie (angehende) Physiklehrkräfte mit wissenschaftlichen Kontroversen, die für den Physikunterricht relevant sind, umgehen und inwiefern sie deren Bildungswert nutzen. Den daraus folgenden Forschungsfragen (siehe Kapitel 4.2, ab S. 143) wurde in einer explorativen qualitativen Laborstudie mit sächsischen Physiklehrkräften ($N = 43$) und Physiklehramtsstudierenden ($N = 22$) der TU Dresden nachgegangen. Das Design der Studie orientiert sich am Modell des Entscheidens nach Betsch, Funke und Plessner (2011, vgl. S. 75). Als Kontext der Erhebung wurde die wissenschaftliche Kontroverse um den Begriff der relativistischen Masse gewählt. Dabei wurden die Befragten zunächst mit verschiedenen Textmaterialien zu den gegensätzlichen Fachpositionen dieser Kontroverse konfrontiert. Während der Auseinandersetzung mit den dadurch gewonnenen Informationen wurden die Studienteilnehmenden aufgefordert sogenannte Gedankenlisten zu erstellen, in denen sie die wichtigsten Gedanken zu den einzelnen Textmaterialien verschriftlichten. Anschließend bearbeiteten die Teilnehmenden der Studie vier Textvignetten mit Bezug zur Thematik der Relativität der Masse im Physikunterricht. Zusätzlich zu diesen Erhebungsinstrumenten wurden zwei Fragebogen zur Erfassung der fachlichen Positionierung vor und nach der Auseinandersetzung mit den Informationen der Textmaterialien zur wissenschaftliche Kontroverse um die Relativität der Masse eingesetzt. Die gewonnen Daten der Gedankenauflistungen sowie die schriftlichen Antworten zu den Textvignetten wurden mit der Software MAXQDA computergestützt analysiert und mithilfe der inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse nach Kuckartz (2016) ausgewertet.

Ergebnisse

Nachfolgend werden die wichtigsten Ergebnisse der Laborstudie zusammengefasst dargestellt.

Die Auswertung der Fragebogendaten ergab für die Massekonzepte der Befragten und damit hinsichtlich ihrer fachlichen Positionierung das folgende Bild: Rund 80% der Lehrkräfte und etwa zwei Drittel der Lehramtsstudierenden betrachten die Masse vor dem Lesen der Textmaterialien als relative (geschwindigkeitsabhängige) Größe. Der Anteil derer, die in der Masse eine invariante Größe sehen, ist in beiden Befragtengruppen gering. Nach der Auseinandersetzung mit den Informationen der Texte sinkt die Zahl der Studienteilnehmenden, die dem Konzept der relativistischen Masse zugeordnet werden konnten. Während der Anteil derer mit einem invarianten Masseverständnis gering bleibt, zeigt sich ein Teil der Studienteilnehmenden unentschieden in Bezug auf die Relativität der Masse.

Bei der Auseinandersetzung der Befragten mit der exemplarisch ausgewählten wissenschaftlichen Kontroverse anhand der Textmaterialien können die folgenden Punkte hervorgehoben werden. Im Zuge der Konfrontation mit den unterschiedlichen wissenschaftlichen Positionen reflektieren die Studienteilnehmenden ihr eigenes Wissen und Verständnis, setzten sich teil-

weise tiefgründig mit den ihnen präsentierten Aussagen und Argumenten auseinander, positionieren sich hinsichtlich der zugrundeliegenden fachwissenschaftlichen Fragestellung und leiten Konsequenzen für den Physikunterricht ab. Ein Vergleich der Datensätze der Lehrkräfte mit denen der Lehramtsstudierenden legt den folgenden wesentlichen Unterschied nahe: Bei den Physiklehramtsstudierenden kann möglicherweise eher mit einer offenen Haltung gegenüber unterschiedlichen, kontroversen fachwissenschaftlichen Positionen und mit einer tendenziell weniger gefestigten eigenen Fachposition gerechnet werden, als es bei Physiklehrkräften der Fall ist. Beim Entscheidungsprozess über die Art der Darstellung des kontroversen Fachinhalts im Unterricht nutzen die Befragten eine Vielzahl verschiedener Bewertungskriterien, darunter zählen Unterrichts- bzw. Schülertauglichkeit sowie die fachliche Richtigkeit eines Ansatzes, einer Fachposition, zu den am häufigsten vorkommenden Kriterien. Basierend auf den Daten der Gedankenauflistungen konnten verschiedene *Nature-of-Science*-Vorstellungen der Studienteilnehmenden rekonstruiert werden. Diese Vorstellungen betreffen vor allem die empirische Natur der Physik und Aushandlungsprozesse im Rahmen kontroverser Diskurse unter Wissenschaftlern. Daneben gehen die Befragten auf Aspekte der Dynamik wissenschaftlicher Erkenntnisse ein, wobei sich vereinzelt auch Hinweise auf ein eher statisches Bild vom Wesen der Physik als Naturwissenschaft finden lassen.

Mithilfe der Textvignetten wurden die Studienteilnehmenden fiktiven Situationen im Unterrichts- bzw. Schulkontext ausgesetzt, in denen sie Handlungsintentionen und -möglichkeiten im Zusammenhang mit der wissenschaftlichen Kontroverse zur Relativität der Masse beschreiben konnten. Auch hier zeigten sich Anhaltspunkte für die Annahme, dass die Lehramtsstudierenden im Vergleich zu den Lehrkräften häufiger offen für Kontroversität und die Förderung von Diskussionsanlässen im Physikunterricht sind. Insgesamt bietet die wissenschaftliche Kontroverse den Befragten Gelegenheit verschiedene *Nature-of-Science*-Aspekte im Unterricht zu thematisieren. Kontroversität in wissenschaftlichen Aushandlungsprozessen sowie die Vorläufigkeit und Entwicklung wissenschaftlicher Erkenntnisse sind dabei häufig von den Lehrkräften und Studierenden beleuchtete Wesenszüge der Naturwissenschaften. Zusätzlich konnte festgestellt werden, dass einigen Teilnehmenden der Studie die Absprache mit Kollegen sowie ein einheitliches fachdidaktisches Vorgehen an der Schule wichtig ist. Die Daten enthalten auch Hinweise darauf, dass das Vorgehen von Physiklehrenden und die fachliche Darstellung im Unterricht explizit hinterfragt werden sollten, um für die Kontroversität in Bezug auf ein bestimmtes Unterrichtsthema zu sensibilisieren.

Zwischen den Studienteilnehmenden manifestierten sich Unterschiede, die mithilfe einer Typenbildung durch Reduktion (vgl. Kuckartz 2016, S. 149 f.), basierend auf den im Rahmen der inhaltlich strukturierenden qualitativen Inhaltsanalyse gewonnenen Kategorien zu den Handlungsintentionen und -möglichkeiten im Unterrichtskontext, systematisch erfasst werden konnten. Die Bildung der Typen wurde anhand der Dimensionen *Kontroversität*, *Nature of Science* und *eigene Position* eines dreidimensionalen Merkmalsraumes vorgenommen. Entsprechend des Merkmalsraumes konnten die Befragten zu den folgenden fünf Typen gruppiert werden:

Typ I: monoperspektivisch

Typ IIa: kontrovers und positioniert

Typ IIb: kontrovers und neutral

Typ IIIa: reflexiv und positioniert

Typ IIIb: reflexiv und neutral

Bei einer Analyse der Einteilung der Befragten gemäß der fünf Typen konnten weder im Hinblick auf das Geschlecht, noch auf das Alter bzw. die Dienstjahre der Studienteilnehmenden auffällige Unterschiede festgestellt werden. Eine Mehrheit der betrachteten Studienteilnehmenden zeigt Ansätze zur Realisierung von Kontroversität im Unterricht. Der Großteil dieser Befragten vertritt daneben auch eine eigene fachwissenschaftliche Position vor den Schülern. Zu Typ I, bei dem im Unterricht nicht auf die Kontroversität des Themas eingegangen wird, wurden ausschließlich Lehrkräfte, jedoch keine Lehramtsstudierenden zugeordnet. Etwa die Hälfte der den Typen zugeordneten Studienteilnehmenden nutzt die wissenschaftliche Kontroverse im Unterricht, um *Nature-of-Science*-Aspekte zu thematisieren bzw. intendiert dies. Betrachtet man die Typen hinsichtlich der Unterrichtsvorerfahrung, lässt sich die Vermutung aufstellen, dass Lehrkräfte möglicherweise eher die Nutzung von *Nature-of-Science*-Lerngelegenheiten im Zusammenhang mit einer wissenschaftlichen Kontroverse im Physikunterricht in Erwägung ziehen, wenn sie noch nicht über Unterrichtserfahrungen zum jeweiligen Thema (ohne Kontroversität) verfügen. Damit kann abschließend festgehalten werden, dass durchaus erhebliche Unterschiede bei der Nutzung des Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen im Physikunterricht bestehen.

10 Diskussion der empirischen Forschungsergebnisse im Hinblick auf bereits vorhandene Erkenntnisse aus Theorie und Forschung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Laborstudie im Hinblick auf bereits vorhandene Erkenntnisse aus Theorie und Forschung eingeordnet und interpretiert. Dabei wird Bezug auf die im Theorieteil dieser Arbeit dargelegten Inhalte genommen. Da die Realisierung des Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen im besonderen Maße von der konkreten Gestaltung des Unterrichts durch die Lehrkräfte abhängig sein wird, sollen an dieser Stelle insbesondere die Handlungsintentionen und -möglichkeiten, die von den Befragten im Unterrichtskontext genannt wurden, betrachtet werden. Zentraler Ausgangspunkt für die Diskussion der Ergebnisse sind dabei die sechs in Kapitel 2.4.1 (ab S. 70) aufgrund theoretischer Vorüberlegungen formulierten Prinzipien und Aspekte eines Unterrichts zu wissenschaftlichen Kontroversen.

Die Kategoriensysteme *I* und *H* zeigen, dass vor allem die beiden Punkte *Kontroversitätsprinzip und Multiperspektivität* sowie *Diskutieren und Argumentieren* für die in dieser Arbeit untersuchten Teilnehmenden der Studie wichtig sind. Entsprechende Kategorien kommen bereits bei der Formulierung von Lernzielen vor und unterstreichen die Bedeutung multiperspektivischer Zugänge im Unterricht, die Sensibilität für Kontroversität sowie Möglichkeiten für Lernende, zu diskutieren und sich zu positionieren. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen anderer Untersuchungen. So geben Lehrkräfte der naturwissenschaftlichen Fächer in einer Studie von Dunlop und Veneu (2019, vgl. S. 701) in Bezug auf wissenschaftliche Kontoversen im Unterricht an, verschiedene Diskussionsformate, einen problemorientierten Unterricht oder auch das Verfassen von Argumentationen anzustreben. Borgerding und Dagistan (2018, vgl. S. 295 f.) konnten in einer Studie mit Lehramtsstudierenden aus dem naturwissenschaftlichen Bereich für die Auseinandersetzung mit Socio-Scientific Issues zeigen, dass einige der Teilnehmenden ihrer Studie Diskussionsgelegenheiten im Schulunterricht nutzen, verschiedene Positionen abbilden und Schülern Raum für eine eigene Meinungen lassen würden. Im Zuge eines Multiperspektivität berücksichtigenden Unterrichts wurde in Kapitel 2.4.1 (ab S. 67) der Frage nachgegangen, ob Lehrkräfte eine neutrale Haltung im Unterricht einnehmen sollten. In den beiden genannten Studien konnte festgestellt werden, dass unter den Lehrkräften bzw. Lehramtsstudierenden die Ansicht vorherrscht, Lehrende sollten eine neutrale Darstellung der Inhalte im Unterricht gewährleisten (vgl. Dunlop und Veneu 2019, S. 699; Borgerding und Dagistan 2018, S. 298). Dies scheint eine verbreitete Vorstellung zu sein, wie auch eine Interview-Studie von Cross und Price (1996, vgl. S. 330) mit Lehrkräften der Naturwissenschaften und

die Untersuchung von Oulton et al. (2004, vgl. S. 497) mit Lehrkräften aus dem Bereich der politischen bzw. gesellschaftswissenschaftlichen Bildung (citizenship education) belegen. Dabei liefert die vorliegende Arbeit jedoch Anhaltspunkte dafür, dass die Entscheidung für eine neutrale Darstellung im Unterricht nicht zwangsläufig mit der Befürchtung einhergeht, die Äußerung der eigenen Position könnte die Lernenden zu stark beeinflussen. Stattdessen kann sich auch in Ermangelung einer eigenen festen Position für Neutralität im Unterricht entschieden werden, wie beispielsweise die repräsentative Einzelfallinterpretation zu Typ IIb (kontrovers und neutral) in Kapitel 8.4.2 (ab S. 227) zeigt. Neben der Befürwortung und Umsetzung von Kontroversität im Unterricht wurden in der vorliegenden Studie auch vereinzelt Fälle gefunden, in denen Kontroversität vermieden werden soll (z. B. „Mit der Diskussion beider Theorien kann sich die Uni auseinandersetzen.“, S2B1). Die Ablehnung der Darstellung verschiedener Betrachtungsweisen im Unterricht könnte möglicherweise auf den Wunsch nach Komplexitätsreduktion oder der Befürchtung einer Überforderung der Schüler zurückgeführt werden, wie entsprechende Codierungen nahelegen. Vergleichbare bzw. daran anknüpfende und in eine ähnliche Richtung weisende Ansichten von Lehrkräften bringt die Studie von Dunlop und Veneu (2019, S. 699) in Form der folgenden sozialen Repräsentationen hervor:

- Lehrkräfte und Schüler verfügen nicht über ausreichende Kenntnisse, um mit wissenschaftlichen Kontroversen in der Schule umzugehen.
- Das Unterrichten wissenschaftlicher Kontroversen ist dem Unterrichten „der Fakten“ und dem Abdecken des Curriculums untergeordnet.
- Das Unterrichten von Kontroversen ist riskant.

Insofern zeigt sich Konsistenz zu den in dieser Arbeit vorgestellten Forschungsergebnissen, dass teilweise Aspekte genannt werden, die gegen den Einbezug wissenschaftlicher Kontroversen im naturwissenschaftlichen Unterricht sprechen.

Die beiden im Theorieteil entwickelten Prinzipien bzw. Aspekte eines Unterrichts zu wissenschaftlichen Kontroversen *Informationsklarheit gewinnen* und *kritische Haltung* konnten im Rahmen des hier durchgeführten Forschungsprojektes ebenfalls empirisch im Datenmaterial nachgewiesen werden. Allerdings kommen entsprechende Codierungen vergleichsweise eher selten vor, so dass diese beiden Gesichtspunkte für die Befragten nicht von entscheidender Bedeutung zu sein scheinen. Auch in den Ergebnissen von Dunlop und Veneu (2019) spielen diese Punkte nur marginal eine Rolle. Bei den Möglichkeiten zur Gestaltung des Unterrichts mit wissenschaftlichen Kontroversen werden von den Lehrkräften „»fact-checking« activities“ (ebd., S. 701) genannt, die sicher im Zusammenhang mit der Informationsgewinnung und kritischen Überprüfung stehen.

Die Idee der Vermittlung von *Bewertungsstrukturwissen* konnte in den analysierten Daten nicht vorgefunden werden. Auch Dunlop und Veneu (2019) gehen nicht auf damit in Verbindung stehende Aspekte in der Beschreibung der von ihnen gefundenen sozialen Repräsentationen ein. Damit kann diesbezüglich nicht mit einer Berücksichtigung entsprechender Inhalte und Ziele im naturwissenschaftlichen Unterricht durch die Lehrenden gerechnet werden.

In den Handlungsintentionen und -möglichkeiten zeigt sich, dass sowohl Physiklehrkräfte als auch die Physiklehramtsstudierenden im Unterricht Aspekte aus dem Bereich *Nature of*

Science thematisieren würden. Diese Bestrebungen können allerdings erst in Verbindung mit den Stimuli der Textvignetten vorgefunden werden, nicht aber in den Lernzielformulierungen der Befragten. Die Forschungsergebnisse von Dunlop und Veneu (2019) enthalten keine Anhaltspunkte für den Einbezug von *Nature-of-Science*-Aspekten beim Unterrichten wissenschaftlich kontroverse Themen. Das könnte bedeuten, dass (angehende) Lehrkräfte nicht allein aus sich selbst heraus die Nutzung des Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen als *Nature-of-Science*-Lerngelegenheit in Betracht ziehen und gezielte Reflexionsanlässe hierzu nützlich sein könnten. In der hier durchgeführten Studie zählen die Kontroversität wissenschaftlicher Aushandlungsprozesse sowie die Dynamik wissenschaftlicher Erkenntnisse, deren Vorläufigkeit und Entwicklung, zu den am häufigsten genannten *Nature-of-Science*-Aspekten. Damit werden von den Befragten Aspektbereiche thematisiert, die anschlussfähig an die in den naturwissenschaftlichen Fachdidaktiken etablierten Wesenszüge der Naturwissenschaften, wie sie beispielsweise Lederman et al. (2002), McComas und Olson (1998) oder Osborne et al. (2003) vorschlagen, sind (siehe Kapitel 2.3.1, ab S. 45). Zusätzlich zeigen die Ergebnisse der Laborstudie, dass die Beschreibung unterrichtsnaher Situationen (Textvignetten) im Zusammenhang mit wissenschaftlichen Kontroversen die Auseinandersetzung und Reflexion von Lehrenden mit *Nature-of-Science*-Aspekten initiieren kann. Dieser Befund lässt Parallelen zum Einsatz sogenannter „critical incidents“, wie sie Nott und Wellington (1998b) gebrauchen, zu. Die beiden Forscher nutzen critical incidents zur Untersuchung der *Nature-of-Science*-Konzepte von Lehrkräften und gelangen zu der Einschätzung, dass sie vor allem als Diskussionsanlässe geeignet sind, um *Nature-of-Science*-Vorstellungen explizieren und thematisieren zu können (vgl. ebd., S. 593). Dieser Anwendungsbereich entsprechender Unterrichtsvignetten wird durch die vorliegende Studie ebenfalls nahegelegt.

Ein wesentlicher Beitrag dieser Arbeit zur fachdidaktischen Erforschung wissenschaftlicher Kontroversen im naturwissenschaftlichen Unterricht ist die Bildung von Typen. Diese erfassen systematisch das durchaus heterogene Spektrum der (angehenden) Physiklehrkräfte hinsichtlich der Nutzung des Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen im Unterricht anhand der drei besonders bedeutsamen Gesichtspunkte:

- Werden Kontroversität, Diskussions- bzw. Positionierungsmöglichkeiten für Schüler im Unterricht berücksichtigt?
- Werden Gelegenheiten zur Thematisierung von *Nature-of-Science*-Aspekten im Unterricht genutzt?
- Wird von der Lehrkraft selbst eine eigene Position im Unterricht vertreten?

Somit zeigt die Typenbildung, wie unterschiedlich Lehrende bei der Auseinandersetzung mit wissenschaftlich kontroversen Themen im Physikunterricht vorgehen würden. Andererseits lassen sich aufgrund der beschriebenen Typen Unterstützungsbedarfe beim Umgang mit wissenschaftlichen Kontroversen im Unterricht identifizieren und darauf aufbauend Angebote für (angehende) Lehrkräfte zur fachdidaktisch fundierten Planung und Durchführung entsprechender Lerneinheiten konzipieren.

11 Limitationen der empirischen Forschungsergebnisse

Die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse müssen unter Berücksichtigung der spezifischen Grenzen aufgrund des explorativ-qualitativen Forschungsdesigns der Studie interpretiert werden. In diesem Abschnitt werden die entsprechenden Limitationen in Bezug auf die Auswahl der Stichprobe, die Konzeption als Laborstudie, die verwendeten Erhebungsinstrumente sowie den thematischen Erhebungskontext betrachtet.

Auswahl der Stichprobe

Die Akquise der Physiklehrkräfte erfolgte im Rahmen einer Lehrkräftefortbildung zur Speziellen Relativitätstheorie, während die Lehramtsstudierenden in einem physikdidaktischen Seminar (Blockveranstaltung) befragt wurden. Damit liegt keine zufällig gezogene oder repräsentative Stichprobe vor, da sich im Sinne des qualitativen, explorativen Designs der Studie an den Zielen und Prinzipien des theoretical sampling orientiert wurde. Dementsprechend besteht für die Ergebnisse der Studie kein Anspruch auf statistische Repräsentativität. Die in dieser Arbeit genannten Häufigkeiten gelten jeweils für die konkreten analysierten Gruppen, sind jedoch nicht auf Lehrkräfte oder Lehramtsstudierende im Allgemeinen zu übertragen. Da die Teilnehmenden der Studie alle der Region Sachsen zuzuordnen sind, ist nicht klar, inwiefern die Befunde der Untersuchung bundesweit dem Inhalt nach verallgemeinerbar sind, da beispielsweise verschiedene Curricula und Zielstellungen in den unterschiedlichen Bildungssystemen der Länder vorgefunden werden können, die möglicherweise Relevanz in Bezug auf die hier untersuchten Forschungsfragen besitzen. Auch im internationalen Vergleich könnten sich kulturell oder bildungspolitisch bedingte Unterschiede zeigen, die in diesem Forschungsprojekt jedoch nicht erfasst werden. Da sich die teilnehmenden Lehrkräfte freiwillig und auf eigene Initiative hin für die Fortbildung anmelden konnten, wäre zumindest theoretisch vorstellbar, dass damit eine Selektion hin zu solchen Lehrkräften verbunden ist, die ein besonderes Interesse an der zugrundeliegenden Fachthematik haben oder allgemein aufgeschlossener gegenüber neuen Inhalten sind. Demgegenüber muss aber auch festgehalten werden, dass beispielsweise die hier gebildeten Typen bereits alle theoretisch denkbaren Kombinationen an Merkmalsausprägungen im Merkmalsraum abdecken, so dass mit der Erweiterung der Stichprobe keine anderen Typen zu erwarten sind.

Konzeption als Laborstudie

Der Vorteil einer Laborstudie, unter kontrollierten, einheitliche Bedingungen zu forschen, impliziert zugleich wichtige Grenzen für die aus ihr abgeleiteten Ergebnisse im Hinblick auf die ökologische Validität der Studie. Aufschnaiter (2014) weist für Laborstudien auf die folgen-

den beiden limitierenden Aspekte hin: Einerseits sei nicht klar, inwiefern sich die Ergebnisse einer Laborstudie auch unter realen Bedingungen im Feldversuch reproduzieren lassen (vgl. ebd., S. 85). Für die vorliegende Studie ist zunächst zu hinterfragen, ob Lehrkräfte oder Lehramtsstudierende sich in ähnlicher Weise, wie in der Erhebung vorgegeben, mit den Inhalten einer wissenschaftlichen Kontroverse auseinandersetzen und welche tatsächlichen Unterrichtssituationen die (angehenden) Lehrkräfte in ihren fachdidaktischen Handlungsstrategien herausfordern würden. In der Studie wurden die Befragten mit vorausgewählten Informationen innerhalb eines definierten Zeitrahmens konfrontiert. Interessen und zur Verfügung stehende individuelle Ressourcen könnten allerdings Faktoren sein, welche die Tiefe der Auseinandersetzung und die damit verbundenen Reaktionen sowie Handlungsoptionen von (angehenden) Lehrkräften beeinflussen. Als weiteren limitierenden Faktor nennt Aufschnaiter (2014, ebd.) die Unterdrückung möglicher „Wechselwirkungen zwischen Variablen“. Auch unter diesem Gesichtspunkt ist zu berücksichtigen, dass die Befragten keine eigenen Rechercheaktivitäten durchführen konnten, um die wissenschaftliche Kontroverse zu analysieren. Durch das Erhebungssetting wurden auch eventuelle Einflüsse aufgrund des Austauschs mit Fachkollegen und der damit verbundenen reflexiven sowie kollaborativen Prozesse ausgeklammert. Auch wenn insofern nicht feststeht, ob die Befunde der Studie direkt auf die Schulpraxis außerhalb der engen Laborbedingungen übertragen werden können, betont Aufschnaiter (2014, vgl. S. 86) jedoch auch den Wert von Laborstudien zu explorativen Forschungszwecken.

Erhebungsinstrumente

Die Verwendung der gewählten Erhebungsinstrumente, insbesondere der Einsatz der Gedankenauflistung und Textvignetten, setzt den Studienergebnissen entsprechende Grenzen. Für die gefundenen Handlungsmöglichkeiten der Befragten im Unterrichtskontext, die mithilfe der Textvignetten untersucht werden konnten, stellt sich die Frage nach der ökologischen Validität: Kann ausgehend von den Ergebnissen zu den Vignetten auch auf das Verhalten in realen Unterrichtssituationen geschlussfolgert werden? Diese Fragestellung kann mithilfe des hier durchgeführten Forschungsdesigns nicht beantwortet werden. Zu bedenken ist jedoch zum einen, dass die Befragten bei der Bearbeitung der Vignetten Zeit hatten, nachzudenken. Damit bestand nicht derselbe Handlungsdruck hin zu einer unmittelbaren spontanen Reaktion, wie er vermutlich in der wirklichen Unterrichtspraxis wahrgenommen werden würde. Zum anderen konnten die verwendeten Textvignetten nicht von real beobachteten Unterrichtssituationen abgeleitet werden, was die Authentizität der Vignetten beeinträchtigen könnte. In Bezug auf die von den Studienteilnehmenden im Zusammenhang mit den Textvignetten thematisierten *Nature-of-Science*-Aspekte sei an dieser Stelle auf eine Kritik von Priemer (2006, vgl. S. 166) hingewiesen. Er führt aus, dass in Frage stehe, inwieweit aus der Reaktion von Befragten aufgrund der Auseinandersetzung mit fiktiven Situationen auf deren epistemologische Überzeugungen geschlossen werden könne. Es sei nicht nachgewiesen, ob mithilfe von Situationsbeschreibungen tatsächlich die individuellen Vorstellungen der Befragten hervorgebracht werden können. Da die in dieser Arbeit beschriebene Untersuchung einen Beitrag leisten soll, zu ergründen, welche *Nature-of-Science*-Aspekte im Physikunterricht vermittelt werden könnten, scheint die Kritik Priemers hinnehmbar zu sein, weil weniger die subjektiven, ganz persönlichen erkenntnistheoretischen Überzeugungen der (angehenden) Lehrkräfte im Vordergrund

stehen, sondern vielmehr deren professionsbezogenes Verständnis des Wesens der Naturwissenschaften, wie es im Zusammenhang mit der Darstellung im Unterricht zutage tritt.

Bei der Methode der Gedankenauflistung muss berücksichtigt werden, dass die Verschriftlichung nicht alle Gedanken der Befragten adäquat abbilden kann, weder hinsichtlich der Quantität noch der Qualität. Mit der sprachlichen Formulierung sind Grenzen verbunden, den eigenen „innerlich vorhandenen" Gedanken äußerlich Ausdruck zu verleihen. Zusätzlich ist das Notieren der Gedanken mit einem höherem Aufwand und Zeitbedarf gegenüber der reinen Kognition (die „Gedanken nur zu denken", aber nicht verschriftlichen zu müssen) verknüpft. So ist es wahrscheinlich, dass lediglich eine bestimmte Auswahl an Gedanken genannt werden wird, während ein anderer Teil unerschlossen bleibt. Darin liegt möglicherweise aber auch ein Vorteil der Gedankenlisten, allein die wichtigsten Informationen zu enthalten.

Kontextspezifität

Für die Untersuchung der Forschungsfragen der vorliegenden Studie wurde die wissenschaftliche Kontroverse um die Relativität der Masse (Spezielle Relativitätstheorie) als exemplarischer Erhebungskontext gewählt. Damit besitzen die in dieser Studie gewonnenen Erkenntnisse zunächst Gültigkeit für den spezifischen Kontext. Inwiefern eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere wissenschaftliche Kontroversen möglich ist, wird in dieser Studie nicht geklärt. Die Auseinandersetzung mit anderen wissenschaftlichen Kontroversen in anderen Kontexten könnte gerade im Bereich *Nature of Science* abweichende Schwerpunkte bedingen. In diesem Zusammenhang weist beispielsweise Guerra-Ramos (2012, vgl. S. 632, 638) darauf hin, dass die Perspektive bzw. das Verständnis von Lehrkräften zur Natur der Naturwissenschaften nicht zwangsläufig als stabil, eindeutig festgelegt und kontextunabhängig betrachten werden dürfe.

12 Implikationen

12.1 Implikationen für die fachdidaktische Forschung

Da bisher nur wenige Erkenntnisse der fachdidaktischen Forschung zu wissenschaftlichen Kontroversen im Physikunterricht (bzw. auch im naturwissenschaftlichen Unterricht allgemein) vorliegen, soll an dieser Stelle ein Ausblick auf mögliche Forschungsprojekte gegeben werden, die sich inhaltlich an die hier dargelegte empirische Untersuchung anschließen könnten. Einige der dabei genannten Anknüpfungspunkte ergeben sich direkt aus den in Kapitel 11 (ab S. 251) diskutierten Limitationen dieser Studie.

Replikation

Ein wesentlicher Bereich der Implikationen für die fachdidaktische Forschung betrifft die Replizierbarkeit der Ergebnisse der vorgelegten Studie. Hierbei wären vor allem Forschungsansätze von Interesse, die über die direkte Replikation der Studie hinausgehen, um die Verallgemeinerbarkeit der Studienerkenntnisse bei Variation des Studiendesigns zu untersuchen.

Konkret wäre zu prüfen, ob sich die Ergebnisse auch an anderen Standorten reproduzieren lassen, um regionale Unterschiede auf nationaler, aber auch internationaler Ebene ausschließen oder entsprechende Einflüsse identifizieren zu können.

Im Sinne der Stützung oder Differenzierung der Befunde der Studie wären Forschungsarbeiten wünschenswert, die ähnliche Forschungsfragen mit anderen Methoden zu klären versuchen. Beispielsweise könnten im Unterschied zu dem hier verwendetem schriftlichen Erhebungsformat Interviewstudien durchgeführt werden, die Informationsmaterialien und Unterrichtsvignetten (Situationsbeschreibungen oder kurze Videosequenzen) als Stimuli nutzen. Denkbar wäre auch der Einsatz von Erhebungsinstrumenten, die geschlossene Items verwenden. Vignetten mit vorgegebenen, wählbaren Handlungsoptionen, aber auch Fragebogen zur Erfassung der *Nature-of-Science*-Vorstellungen im Zusammenhang mit wissenschaftlichen Kontroversen oder möglicher Handlungsprinzipien in Bezug auf Kontroversität im naturwissenschaftlichen Unterricht würden eine stärkere Quantifizierung der Erkenntnisse erlauben. Die Umsetzung solcher quantitativ angelegter Studien wie auch die Formulierung geschlossener Items kann dabei auf den hier gewonnenen Kategoriensystemen aufbauen. Analysen von Gruppendiskussionen könnten insbesondere den Einfluss des Austauschs mit Fachkollegen genauer untersuchen. Dies wäre im Hinblick auf die Bedeutung der Absprache mit Kollegen bzw. dem Wunsch nach einem einheitlichen Vorgehen an Schulen, wie von den Befragten in der vorgelegten Studie geäußert, ein lohnenswertes Forschungsziel.

Da die gewonnenen Erkenntnisse der in dieser Arbeit dargestellten Studie eng an den spezifischen Erhebungskontext geknüpft sind, ist vor allem die Frage nach der Reproduzierbarkeit oder Abweichung der Ergebnisse bei Veränderung des zugrundeliegenden thematischen Fachkontextes bedeutsam. Insofern sollte geprüft werden, welche Erkenntnisse sich im Zusam-

menhang mit anderen wissenschaftlichen Kontroversen bzw. fachwissenschaftlichen Themengebieten ergeben. Denkbar wären hierfür zum Beispiel Inhalte aus den Bereichen der Quantenphysik, der Astronomie oder der Kosmologie.

Forschung im Feld

Die Ergebnisse der hier vorgestellten Laborstudie lassen offen, inwieweit Lehrende auch im realen Unterricht entsprechend der gefundenen Handlungsmöglichkeiten agieren würden. Unterrichtsbeobachtungen im Feld könnten daher einen wichtigen Beitrag zu der Fragestellung leisten, wie Physiklehrkräfte mit wissenschaftlichen Kontroversen im Physikunterricht umgehen und inwiefern sie tatsächlich Ziele in Bezug auf deren Bildungswert verfolgen. Dabei könnte zusätzlich untersucht werden, welche methodischen Gestaltungsmöglichkeiten im Unterricht, beispielsweise zur Realisierung von Diskussionsformaten, konkret von Lehrenden genutzt werden. Im Hinblick auf die Thematisierung von *Nature-of-Science*-Aspekten wäre beispielsweise zu ergründen, ob diese Aspekte in einem Unterricht mit wissenschaftlichen Kontroversen reflexiv und explizit vermittelt werden. Unter Umständen ist eine Case Study empfehlenswert, mit deren Hilfe eine vertiefende Analyse sowohl des Einflusses der individuellen, selbstständigen Auseinandersetzung mit frei verfügbaren Informationen während der eigenen Rechercheaktivitäten als auch der persönlichen Erfahrungen von Lehrenden möglich wird.

Forschung im Bereich Lehrerbildung

Im Bereich der Lehrerbildung stellt sich die übergeordnete Frage, wie (angehende) Lehrkräfte auf den Umgang mit wissenschaftlichen Kontroversen in geeigneter Weise vorbereitet werden können. Besonders wichtig wird damit die Entwicklung von Angeboten sein, die Lehramtsstudierende im Studium oder Lehrkräfte in Fortbildungen für den Umgang mit wissenschaftlichen Kontroversen auch im naturwissenschaftlichen Unterricht schult. Entsprechende Angebote sollten dabei wissenschaftlich begleitet werden, um deren Wirksamkeit zu beurteilen und Faktoren sowie Rahmenbedingungen zu erkennen, die dem Gelingen und der Effektivität solcher Formate zuträglich sind.

Empirische Studien mit Schülern

Fachdidaktische Erkenntnisse zur Perspektive von Schülern auf wissenschaftliche Kontroversen im naturwissenschaftlichen Unterricht und der damit verbundenen Frage, inwiefern Schüler von der Auseinandersetzung mit wissenschaftlichen Kontroversen profitieren könnten, stellen ein Forschungsdesiderat von besonderer Relevanz dar. Interventionsstudien im Pre-Post-Design könnten Aufschluss darüber geben, ob sich durch den Einbezug wissenschaftlicher Kontroversen im Physikunterricht positive Veränderungen hinsichtlich der Kommunikations- oder Erkenntnisgewinnungskompetenz, speziell im Bereich der *Nature-of-Science*-Vorstellungen, messen lassen. Konkrete Ansätze zur Unterrichtskonzeption sowie die Gestaltung von Lernmaterialien können mit Hilfe von Akzeptanzbefragungen erforscht werden, um das Potenzial wissenschaftlicher Kontroversen für den Physikunterricht genauer erschließen zu können. Nicht zu vernachlässigen ist die Fragestellung, ob der Einbezug wissenschaftlicher Kontroversen in den Physikunterricht (und die damit einhergehende Betonung von Erkenntnisprozessen gegenüber als „fertig“ präsentierten Wissensbeständen) auch Auswirkungen auf das themen- oder fachspezifische Interesse bzw. die Motivation der Schüler hat.

12.2 Implikationen für die Lehrerbildung

Basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit können einige Schlussfolgerungen im Hinblick auf die Lehrerbildung gezogen werden. Die Ergebnisse der Studie sprechen insgesamt nicht für ein breit vorhandenes, reflektiertes und fachdidaktisch fundiertes Wissen zum Umgang mit wissenschaftlichen Kontroversen im Unterricht seitens der (angehenden) Physiklehrkräfte. Eher zeigen die gebildeten Typen, wie heterogen sich dieser Umgang gestaltet und wie unterschiedlich damit die Nutzung des Bildungswertes wissenschaftlicher Kontroversen im Physikunterricht eingeschätzt werden muss. Um (zukünftigen) Physiklehrkräften dementsprechend einen systematischen Rahmen für das fachdidaktische Handeln zu vermitteln, sollten Fortbildungsangebote für Lehrkräfte im Schuldienst konzipiert werden und Lehramtsstudierende während ihrer universitären Ausbildung für entsprechende Aspekte sensibilisiert werden. Dabei spielen sowohl fachdidaktische als auch fachwissenschaftliche Inhalte eine Rolle.

Fachwissenschaftliche Inhalte

Die Grundlage für das Verständnis einer wissenschaftlichen Kontroverse bildet deren fachwissenschaftliche Durchdringung. Um wissenschaftlich kontroverse Themen in den Schulunterricht zu integrieren, müssen Lehrkräfte selbst über ausreichendes Wissen zum jeweiligen Sachverhalt auf der Höhe der Zeit verfügen. Diese Kenntnisse können einerseits im Lehramtsstudium an den Universitäten vermittelt werden, indem der Themenkanon der fachwissenschaftlichen universitären Ausbildung auch wissenschaftliche Kontroversen enthält. Dazu können neben Ausblicken auf aktuelle Forschung und noch ungeklärte Fragestellungen der Wissenschaft auch historische wissenschaftliche Kontroversen herangezogen werden. Gleichwohl diese zwar aus der Perspektive der Gegenwart aufgelöst und damit nicht länger kontrovers sind, dienen sie der exemplarischen Verdeutlichung der Rolle von Kontroversität in den Naturwissenschaften. In jedem Fall sollte auch für die universitäre Lehre die Darstellung der Entwicklung wissenschaftlicher Erkenntnisse in sozialen Aushandlungsprozessen eine Leitidee sein. Andererseits sollten für Lehrkräfte, die bereits in der Praxis tätig sind, Möglichkeiten zur fachwissenschaftlichen Weiterbildung, Aktualisierung und Vertiefung wissenschaftlich kontroverser Themen in Lehrkräftefortbildungen bestehen.

Fachdidaktische Inhalte

In fachdidaktischen Seminaren für Lehramtsstudierende und in Lehrkräftefortbildungen zum Umgang mit wissenschaftlichen Kontroversen im Unterricht sollten die folgenden Inhalte abgebildet werden:
Zunächst erscheint es unerlässlich den Bildungswert wissenschaftlicher Kontroversen für den Physikunterricht explizit zu thematisieren. Dies wird insofern nahegelegt, als das die Beschreibung des Typs I in dieser Arbeit zeigt, dass nicht davon ausgegangen werden kann, dass Lehrende automatisch das Potenzial wissenschaftlicher Kontroversen für den Physikunterricht erkennen und entsprechende Zielstellungen für ihren eigenen Unterricht verfolgen.

Für einen reflektierten fachdidaktischen Umgang mit wissenschaftlich kontroversen Themen im Unterricht sollten die in Kapitel 2.4.1 (ab S. 70) erörterten Prinzipien und Gesichtspunkte mit (angehenden) Physiklehrkräften erarbeitet und diskutiert werden. Speziell für den

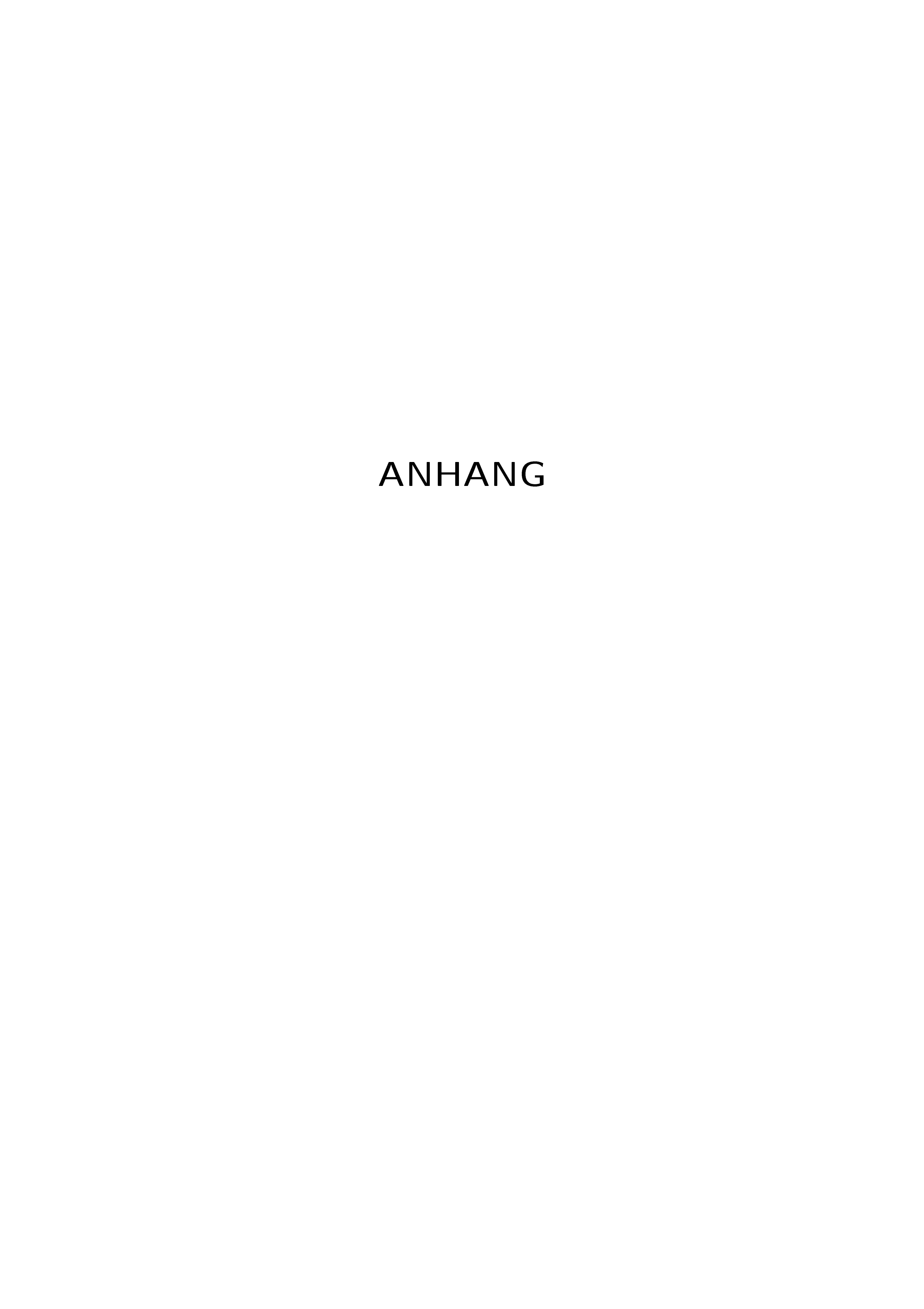
Punkt *Nature of Science thematisieren* sollten fachdidaktische Erkenntnisse zur Vermittlung entsprechender Inhalte, wie die Bedeutung reflexiver und expliziter Lerngelegenheiten, vertieft werden. Gerade im Hinblick auf die beiden Aspekte *Kontroversitätsprinzip und Multiperspektivität* sowie *Diskutieren und Argumentieren* sollten verschiedene Handlungsmöglichkeiten im Unterricht reflektiert werden. Hierbei sollte auch auf die Frage der Neutralität der Lehrkräfte im Unterricht eingegangen werden, um ein Bewusstsein dafür zu etablieren, dass Neutralität prinzipiell nicht möglich. Dementsprechend günstig kann es sein, wenn Lehrkräfte transparent und für die Schüler nachvollziehbar eine eigene Fachposition im Unterricht vertreten. Daneben können auch konkrete Unterrichtsmethoden zur zielgerichteten Nutzung von Argumentations- und Diskussionsgelegenheiten im Unterricht vermittelt werden.

Fachdidaktische Handlungsempfehlungen zum Umgang mit wissenschaftlichen Kontroversen im naturwissenschaftlichen Unterricht können jedoch auch in Form von Informations- oder Unterrichtsmaterialien für Lehrkräfte (Lehrerhandreichungen) zur Verfügung gestellt werden.

Entwicklung von Lernmaterialien

Die fachliche Klärung, Aktualisierung und Ausarbeitung von Lernmaterialien für den Unterricht ist für Lehrkräfte teilweise besonders aufwändig. Deshalb wäre die Entwicklung von Unterrichtsmaterialien oder Lehrbuchinhalten für Schüler, die bereits eine fachdidaktische Aufbereitung und Elementarisierung wissenschaftlich kontroverser Themen beinhalten, zu begrüßen.

Die hier genannten Möglichkeiten könnten einen Beitrag leisten, das Potenzial wissenschaftlicher Kontroversen für den Physikunterricht auch in der Praxis zu entfalten.



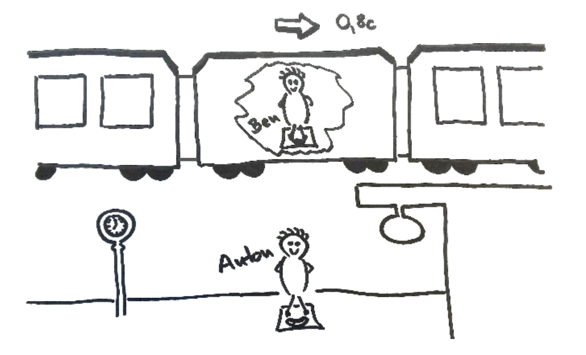
ANHANG

A Erhebungsinstrumente

A.1 Fragebogen 1 (Version für Lehrkräfte)

<table>
<tr><td colspan="6">Pseudonym:</td></tr>
<tr><td>Geschlecht:</td><td>☐ weiblich</td><td>☐ männlich</td><td colspan="3">☐ keine Angabe</td></tr>
<tr><td>Alter:</td><td>☐ ≤ 29</td><td>☐ 30 – 39</td><td>☐ 40 – 49</td><td>☐ 50 – 59</td><td>☐ ≥ 60</td></tr>
<tr><td>Dienstjahre:
(ohne Referendariat)</td><td>☐ ≤ 5</td><td>☐ 6 – 10</td><td>☐ 11 – 20</td><td>☐ 21 – 30</td><td>☐ ≥ 31</td></tr>
<tr><td>Schulart (in der Sie tätig sind):
☐ Gymnasium
☐ Oberschule
☐ Berufsschule</td><td colspan="2">Lehrbefähigung in den Unterrichtsfächern:
1.
2.
3.</td><td colspan="3">Unterrichtsfächer, in denen Sie zurzeit unterrichten:
1.
2.
3.</td></tr>
<tr><td colspan="6">Lehrerfahrung im Physikunterricht der Sekundarstufe II:
☐ keine ☐ GK ☐ LK</td></tr>
<tr><td colspan="6">Ich habe das Thema Spezielle Relativitätstheorie schon unterrichtet:
☐ nein ☐ ja, im GK ☐ ja, im LK ☐ ja, ____</td></tr>
</table>

1. Anton und Ben sind zwei <u>identische Zwillinge</u> (exakt gleiche Körper). Anton beobachtet Ben vom Bahnsteig aus. Ben befindet sich in einem Eisenbahnwagen, der sich relativ zu Anton auf dem Bahnsteig geradlinig und mit einer konstanten Geschwindigkeit von $0{,}8c$ bewegt. Anton liest von seiner Waage einen Wert von 80 kg ab.



Kreuzen Sie jeweils an, welcher Antwort Sie zustimmen würden.

1.1 Welchen Wert kann Anton von Bens Waage ablesen?
- ☐ Anton liest von Bens Waage ebenfalls 80 kg ab.
- ☐ Anton liest von Bens Waage mehr als 80 kg ab.
- ☐ Anton liest von Bens Waage weniger als 80 kg ab.

Geben Sie an, wie sicher Sie mit Ihrer Antwort sind:

☐ -------------- ☐ -------------- ☐ -------------- ☐

sehr unsicher sehr sicher

1.2 Welchen Wert liest Ben von seiner Waage im Zug ab?
- ☐ Ben liest von seiner Waage ebenfalls 80 kg ab.
- ☐ Ben liest von seiner Waage mehr als 80 kg ab.
- ☐ Ben liest von seiner Waage weniger als 80 kg ab.

Geben Sie an, wie sicher Sie mit Ihrer Antwort sind:

☐ -------------- ☐ -------------- ☐ -------------- ☐

sehr unsicher sehr sicher

2. Kreuzen Sie jeweils an, ob die folgenden *Aussagen* (*kursiv*) Ihrer Meinung nach wahr oder falsch sind.

2.1 In einem Teilchenbeschleuniger wird die Geschwindigkeit eines Protons immer mehr erhöht.
Aussage: *Im Bezugssystem des Teilchenbeschleunigers (Erde) gilt dann: Die Masse des Protons erhöht sich mit seiner Geschwindigkeit.*

☐ wahr
☐ falsch

Geben Sie an, wie sicher Sie mit Ihrer Antwort sind:

☐ -------------- ☐ -------------- ☐ -------------- ☐
sehr unsicher sehr sicher

2.2 Aussage: *Die Masse eines Teilchens ist unabhängig vom Bezugssystem.*

☐ wahr
☐ falsch

Geben Sie an, wie sicher Sie mit Ihrer Antwort sind:

☐ -------------- ☐ -------------- ☐ -------------- ☐
sehr unsicher sehr sicher

2.3 Um die Geschwindigkeit eines Körpers zu erhöhen, wird ihm die Energie ΔE zugeführt.
Aussage: *Dabei führt ein Teil der Energie ΔE zur Beschleunigung und ein anderer zu einer Massenzunahme des Körpers.*

☐ wahr
☐ falsch

Geben Sie an, wie sicher Sie mit Ihrer Antwort sind:

☐ -------------- ☐ -------------- ☐ -------------- ☐
sehr unsicher sehr sicher

2.4 Aussage: *Ein Photon besitzt aufgrund seiner kinetischen Energie eine Masse.*

☐ wahr
☐ falsch

Geben Sie an, wie sicher Sie mit Ihrer Antwort sind:

☐ -------------- ☐ -------------- ☐ -------------- ☐
sehr unsicher sehr sicher

2.5 Ein Beobachter bewegt sich einem Teilchen gegenüber immer geradlinig und mit konstanter Geschwindigkeit v. Zu einem bestimmten Zeitpunkt erhöht er seine Geschwindigkeit von $v = 0{,}4c$ auf $v = 0{,}7c$.
Aussage: *Aus Sicht des bewegten Beobachters ist die Masse des Teilchens eine unveränderliche Eigenschaft.*

☐ wahr
☐ falsch

Geben Sie an, wie sicher Sie mit Ihrer Antwort sind:

☐ -------------- ☐ -------------- ☐ -------------- ☐
sehr unsicher sehr sicher

A.2 Textmaterialien und Instruktion zur Gedankenauflistung

Auf den folgenden Seiten finden Sie auf jedem A4-Blatt (Vor- u. ggf. Rückseite) Lesematerial zur Thematik *„Die Masse in der Speziellen Relativitätstheorie"*.

Aufgabe während des Lesens: Anfertigung einer Gedankenliste

Lesen Sie diese Materialien (Nr. 1 – Nr. 7) und fertigen Sie nach dem Lesen jedes einzelnen Materialblattes (A4-Blatt) bitte eine kurze Liste Ihrer Gedanken an, die Sie in Zusammenhang mit allen bis dahin gelesenen Materialien haben.
Die Gedankenlisten sollen keine Zusammenfassungen des gelesenen Materials sein, sondern Ihre eigenen, persönlich wichtigsten Gedanken enthalten (z. B. Eindrücke, Gefühle, Überlegungen, Verständnis von Begriffen, Vorstellungen, Ansichten, Ideen, Fragestellungen, Urteile, Meinungen, …).

→ Beispiel zur Erstellung der Gedankenlisten:

Gedanken nach Material Nr.1:
- [erster Gedanke]
- [zweiter Gedanke]
- …

Gedanken nach Material Nr.1 und Nr.2:
- [erster Gedanke]
- [zweiter Gedanke]
- …

Gedanken nach Material Nr.1, Nr.2 und Nr.3:
- [erster Gedanke]
- [zweiter Gedanke]
- …

usw.

Material Nr. 1

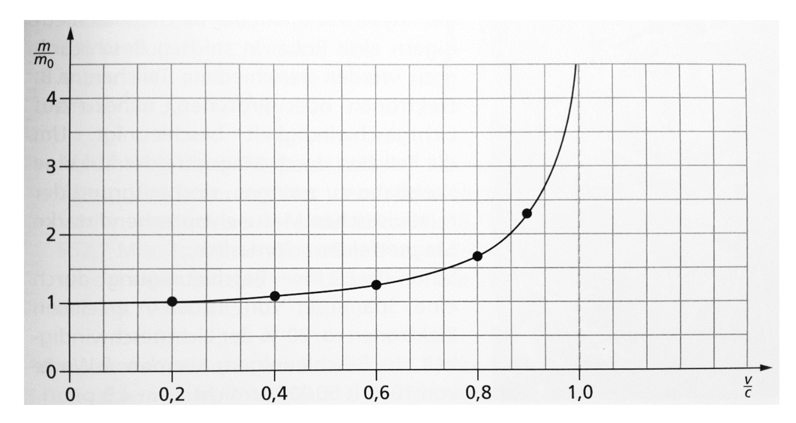
Hinweis für das Lesen des Materials:
Lesen Sie die beiden Unterrichtsmaterialien vergleichend hinsichtlich der Thematik:
„Die Masse in der Speziellen Relativitätstheorie"

Unterrichtsmaterial 1 – Text aus einem Physiklehrbuch

Die Masse eines Körpers oder Teilchens, die ein Beobachter registriert, der sich in einem Inertialsystem gegenüber dem Körper oder dem Teilchen in Ruhe befindet, wird als Ruhemasse bezeichnet.

Werden aber z.B. Elektronen durch elektrische Felder beschleunigt, dann zeigt sich, dass ihre Masse nicht konstant ist, sondern mit der Geschwindigkeit zunimmt.

Der Zusammenhang zwischen Masse und der Geschwindigkeit ist im nachfolgenden Diagramm dargestellt.



Die Masse eines Körpers oder Teilchens nimmt mit seiner Geschwindigkeit zu. Allgemein gilt:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \cdot m_0$$

m	Masse des bewegten Körpers oder Teilchens
m_0	Ruhemasse
v	Geschwindigkeit
γ	Lorentzfaktor

Die Masse m eines bewegten Körpers oder Teilchens wird im Unterschied zur Ruhemasse auch als relativistische Masse oder als dynamische Masse bezeichnet.

Quelle: Meyer, Schmidt (Hrsg.): *DUDEN Physik. Gymnasiale Oberstufe*. 2., vollst. überarb. Ausgabe. Berlin: Cornelsen 2016. S. 527

Unterrichtsmaterial 2 – Text aus einem Unterrichtsmaterialheft

Bewegte Masse und Ruhemasse

Die Ruhemasse m eines Teilchens, d. h. die Masse eines Teilchens in seinem Ruhesystem, ist eine fundamentale, unveränderliche Eigenschaft eines jeden Teilchens, die es eindeutig charakterisiert. Oft wird neben der Ruhemasse eines Teilchens die sogenannte bewegte (auch: dynamische) Masse m_{bewegt} eingeführt. Sie ist definiert als $m_{bewegt} = \gamma \cdot m$, mit dem Lorentzfaktor $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$. Für Betrachtungen in der Teilchenphysk ist das Einführen der bewegten Masse jedoch aus folgenden Gründen nicht sinnvoll.
Die bewegte Masse eines Teilchens ist abhängig von der Geschwindigkeit des Teilchens. Sie ist damit abhängig vom gewählten Bezugssystem und daher keine unveränderliche Eigenschaft des Teilchens.
Der Impuls p eines sich mit einer Geschwindigkeit v nahe der Lichtgeschwindigkeit bewegenden Teilchens ist gegeben durch $p = \gamma \cdot m \cdot v$. Durch das Einführen der bewegten Masse des Teilchens lässt sich diese Beziehung umformen zu $p = m_{bewegt} \cdot v$. Diese Gleichung ähnelt der klassischen Beziehung $p = m \cdot v$ zwischen Impuls, Masse und Geschwindigkeit. Anders verhält es sich jedoch für das Newtonsche Gesetz $F = m \cdot a$: Für ein sich mit einer Geschwindigkeit nahe der Lichtgeschwindigkeit c parallel zu einer Kraft F bewegendes Teilchen lautet das Newtonsche Gesetz $F = \gamma^3 \cdot m \cdot a$. Es lässt sich durch das Einführen der bewegten Masse $m_{bewegt} = \gamma \cdot m$ des Teilchens jedoch *nicht* in eine Form ähnlich der klassischen Relation $F = m \cdot a$ bringen.
Daher wird in der Teilchenphysik und entsprechend auch in den vorliegenden Materialien ausschließlich die Ruhemasse verwendet, die kurz als *Masse* bezeichnet wird.

Quelle: Kobel, M. et al.: *Teilchenphysik. Unterrichtsmaterial ab Klasse 10. Forschungsmethoden.* 1. Auflage. Hamburg: Joachim Herz Stiftung 2018. S. 10 (Änderung: keine Fußnoten enthalten)

Material Nr. 2

Hinweis für das Lesen des Materials:
Lesen Sie die beiden Quellen vergleichend hinsichtlich der Thematik:
„Die Masse in der Speziellen Relativitätstheorie"

Quelle 1:

Auszug aus dem sächsischen Physiklehrplan,
Leistungskurs der Jahrgangsstufe 11
Lernbereich 6: *Einblick in die Relativitätstheorie*

Lernbereich 6: Einblick in die Relativitätstheorie	**8 Ustd.**
Kennen der Postulate und grundlegender Aussagen der Speziellen Relativitätstheorie	Satellitennavigationssysteme
- klassisches Relativitätsprinzip	Begriff Inertialsystem; Galilei-Transformation
- Michelson-Experiment	
- Relativitätsprinzip	Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit
- Relativität der Gleichzeitigkeit	Experimente mit bewegten Atomuhren
- Zeitdilatation	
- Längenkontraktion	Myonenzerfall, Raumzeit
- Relativität der Masse	klassische Mechanik als Sonderfall der Speziellen Relativitätstheorie
- Äquivalenz von Masse und Energie $E = m \cdot c^2$	
Einblick gewinnen in ausgewählte Aussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie	Gravitation und gekrümmte Raumzeit; Experimente mit Atomuhren; schwarze Löcher im Kosmos; Theorie des Urknalls → RE/e, Lk 12, LB 2

Quelle: Sächsisches Staatsministerium für Kultus und Sport (Hrsg.): *Lehrplan Gymnasium. Physik. 2004/2007/2009/2011.* S. 47

Quelle 2:

Das Türkische Bildungsministerium (2008) schreibt im Lehrplan (ab dem Schuljahr 2009/10) für die Klassenstufe 10:

„Die Idee, dass die Masse eines Objekts von der Geschwindigkeit abhängt, verursacht Widersprüche und macht daher keinen Sinn. Deswegen verliert der Begriff der »Ruhemasse« seine Bedeutung, sodass nur eine »Masse« für Objekte verwendet werden sollte."

Quelle: Selçuk, G. S. (2011): *Adressing pre-service teachers´ understandings and difficulties with some core concepts in the special theory of relativity*. In: European Journal of Physics **32**, S. 11

Material Nr. 1 und Nr. 2 zeigen, dass man verschiedene Positionen zu der folgenden Frage findet:

Ist die Masse eines Objektes in der Speziellen Relativitätstheorie abhängig von dessen Geschwindigkeit?

Hinweis zu verschiedenen Formulierungen:
Die folgenden fünf Formulierungen sind weitestgehend äquivalent zueinander und meinen einen entsprechenden Sachverhalt:

In der Speziellen Relativitätstheorie ist die Masse eines Objektes …
… abhängig von dessen Geschwindigkeit.
… relativ.
… abhängig vom Bezugssystem.
… nicht invariant.
… veränderlich.

Fertigen Sie auch zu den folgenden fünf Materialblätter (Nr. 3 bis Nr. 7) jeweils eine kurze Gedankenliste an.
Lesen Sie die Materialien dabei unter der Fragestellung:

Wie würde ich die Thematik *„Die Masse in der Speziellen Relativitätstheorie“* in meinem eigenen Physikunterricht darstellen und vermitteln?

Material Nr. 3 **Autor: L. B. Okun**

Das Konzept der Masse

„In der modernen Sprache der Relativitätstheorie gibt es nur eine Masse, die Newtonsche Masse m, die sich nicht mit der Geschwindigkeit verändert; daher muss die berühmte Formel $E = mc^2$ mit einer gewissen Vorsicht betrachtet werden.

[…]

In der relativistischen Physik (und oft bei der Lehre der relativistischen Physik) verwenden Teilchenphysiker nur den Begriff "Masse". Nach dieser rationalen Terminologie sind die Begriffe "Ruhemasse" und "relativistische Masse" überflüssig und irreführend. Es gibt nur eine Masse in der Physik, m, die nicht vom Bezugssystem abhängt. Sobald Sie die "relativistische Masse" verwerfen, brauchen Sie die andere Masse nicht als "Ruhemasse" zu bezeichnen und sie mit dem Index 0 zu kennzeichnen.

[…]

Zwei grundlegende Gleichungen

Kehren wir zur Gleichung $E_0 = mc^2$ zurück. Ihre Gültigkeit ist offensichtlich, wenn zwei Grundgleichungen der speziellen Relativitätstheorie für einen freien Körper verwendet werden:

$$E^2 - \boldsymbol{p}^2c^2 = m^2c^4 \qquad (5)$$

$$\boldsymbol{p} = \boldsymbol{v}\frac{E}{c^2} \qquad (6)$$

Dabei ist E die Gesamtenergie, $\boldsymbol{p}$ der Impuls, $\boldsymbol{v}$ die Geschwindigkeit und m die gewöhnliche Masse, wie in der Newtonschen Mechanik.

Für $\boldsymbol{v} = 0$, erhalten wir $\boldsymbol{p} = 0$ und $E = E_0$, die Energie des ruhenden Körpers. Dann folgt aus Gleichung (5):

$$E_0 = mc^2.$$

[...] Die Ruheenergie war eine der großen Entdeckungen Einsteins.

Warum habe ich m, aber nicht m_0 in Gleichung (5) geschrieben? Um die Antwort zu erkennen, betrachten wir den Fall $v \ll c$. In diesem Fall gilt:

$$\boldsymbol{p} \approx \boldsymbol{v}\frac{E}{c^2} = \boldsymbol{v}m \qquad (7)$$

$$E = E_0 + E_{kin} = \sqrt{p^2c^2 + m^2c^4} = mc^2 + \frac{\boldsymbol{p}^2}{2m} + \cdots$$

und

$$E_{kin} = \frac{\boldsymbol{p}^2}{2m}.$$

So erhalten wir für den nichtrelativistischen Grenzfall die bekannten Newtonschen Gleichungen für Impuls und kinetische Energie. Das bedeutet, dass m in Gleichung (5) die gewöhnliche Newtonsche Masse ist. Würde ich also m_0 anstelle von m verwenden, würden die relativistischen und nichtrelativistischen Schreibweisen nicht übereinstimmen.

Wenn die Notation m_0 und der Begriff "Ruhemasse" schlecht sind, warum sind dann die Notation E_0 und der Begriff "Ruhenergie" gut? Die Antwort lautet: Weil Masse eine relativistische Invariante ist und in verschiedenen Bezugssystemen gleich groß ist, die Energie ist […] in verschiedenen Bezugssystemen unterschiedlich groß. Der Index 0 in E_0 gibt das Ruhesystem des Körpers an.

Andererseits sind alle Physiker und viele Nichtphysiker mit der "berühmten Einstein-Formel $E = mc^2$" vertraut. Aber es ist offensichtlich, dass die Gleichungen $E_0 = mc^2$ und $E = mc^2$ absolut verschieden sind. Gemäß Gleichung $E_0 = mc^2$ ist m konstant und das Photon ist masselos.[1] Gemäß der Gleichung $E = mc^2$ hängt m von der Energie (der Geschwindigkeit) ab und das Photon hat die Masse $m = \frac{E}{c^2}$.
[…]

Quelle: Okun, L. B. (1989): *The concept of mass*. In: Physics Today **42(6)**, 32

Nicht die Masse eines relativistisch bewegten Körpers bestimmt seine Wechselwirkung mit dem Gravitationsfeld. Diese Wechselwirkung wird durch einen Ausdruck bestimmt, der von der Energie und dem Impuls des Körpers abhängt.

Quelle: Okun, L. B. (1989): *The concept of mass (mass, energy, relativity)*.
In: Soviet Physics Uspekhi **32**, 629

Vor vielen Jahren, als sich die Spezielle Relativitätstheorie noch im Prozess der Entwicklung und experimentellen Bestätigung befand, wurden viele Begriffe und Schreibweisen eingeführt, die später aufgegeben wurden […]. Leider werden einige dieser überholten Begriffe immer noch von den Autoren vieler Lehrbücher, populärer Bücher und Artikel gefördert. Eine der Hauptquellen für Verwirrung ist die Verwendung der nichtrelativistischen Beziehung zwischen Impuls und Geschwindigkeit $p = mv$ anstelle der relativistischen Gleichung $p = m\gamma v$. Als Resultat dessen spielt m in der Gleichung $p = mv$ die Rolle von $m\gamma$ in der Gleichung $p = m\gamma v$. Dies führt zu der falschen Schlussfolgerung, dass die Masse eines Körpers mit seiner Geschwindigkeit zunimmt. Diese "Masse" wird als relativistische Masse bezeichnet.

Quelle: Okun, L. B. (1998): *Note on the meaning and terminology of Special Relativity.*
In: European Journal of Physics **19**, 403

[1] dieser Begründung nach gilt: Ein Photon besitzt ausschließlich kinetische Energie, aber keine Ruheenergie ($E_0 = 0 \Rightarrow m = 0$), da für ein Photon kein Ruhesystem gefunden werden kann (ein Photon besitzt in jedem Bezugssystem $v = c$)

Material Nr. 4 **Autor: T. R. Sandin**

Zur Verteidigung der relativistischen Masse

„**Die Pro- und Anti-Ansichten**
Die eine Gleichung, die fast jeder Student zu einer einführenden Behandlung der Relativitätstheorie mitbringt, ist $E = mc^2$. Von einem pro-relativistische-Masse-Standpunkt (der Pro-Ansicht) aus betrachtet, besagt diese berühmte Gleichung mit eleganter Einfachheit, dass Energie und Masse gleichwertig sind: Wenn Sie eine der beiden Größen erhöhen, vergrößern Sie auch die andere proportional (c^2 ist lediglich der Umrechnungsfaktor von Masseeinheiten zu Energieeinheiten). […]
Der anti-relativistische-Masse-Standpunkt (die Anti-Ansicht) besitzt nicht diese einfache Schönheit. In der Anti-Ansicht bezieht sich $E = mc^2$ angeblich nur auf die Ruhemasse. Wenn also ein einzelnes Teilchen eine gegebene Geschwindigkeit v hat, bleibt seine Masse m_0, während seine Energie auf $E_0 + K$ ansteigt. Betrachten wir ein System, das aus mehr als einem Teilchen zusammengesetzt ist, wie etwa ein einatomiges ideales Gas in einem ruhenden Behälter in einem Inertialsystem. Dann erscheint die Anti-Ansicht scheinbar inkonsistent, da, obwohl die Masse jedes Atoms m_{0i} bleibt, die Ruhemasse des Systems nicht $\sum m_{0i}$ ist, sondern $\sum(m_{0i} + K_i/c^2)$. Wir sehen, dass wir mit jeder der beiden Ansichten die Ruhemasse des Systems damit erhalten, was die Pro-Ansicht einfach die Summe der relativistischen Massen der Teilchen nennt. Nehmen wir an, wir ändern die Temperatur des Gases, indem wir seine innere Energie um ΔU ändern. Beide Ansichten stimmen darin überein, dass die Masse des Gases um $\Delta U/c^2$ zunimmt, aber die Anti-Ansicht besagt, dass sich für keines der Atome eine Massenänderung ergibt. Die Pro-Ansicht stimmt damit nicht überein und gibt für die N idealen Gasatome eine durchschnittliche Massenänderung von $\Delta U/(c^2 N)$ an. […] Welche dieser Sichtweisen ergibt für Studenten eines Einführungskurses mehr Sinn?
[…]

Das Photon
Das Photon ist für anti-relativistische-Masse-Befürworter ein Problem. Sie argumentieren, dass, da das Photon keine Ruhemasse besitzt und es keine relativistische Masse gibt (zumindest nicht für ein einzelnes Teilchen), ein einzelnes Photon niemals eine Masse besitzt. Obwohl ein Photon von Objekten mit Masse angezogen wird und diese anzieht, vertreten Sie die Meinung, dass es keine schwere Masse besitzt. […] Ein Photon kann Masse von einer Quelle zu einem Absorber übertragen, aber es wird behauptet, dass es dabei keine Masse trägt. Es braucht eine Kraft, um ein Photon zu starten, ein Photon zu stoppen oder seine Richtung zu ändern, aber es wird ihm keine träge Masse zugesprochen. […] Wie könnte diese Anti-Ansicht über Photonen einem Studenten eines Einführungskurses einfach oder konsistent erscheinen?
[…]

Quelle: Sandin, T. R. (1991): *In defense of relativistic mass*.
In: American Journal of Physics **59**, 1032

Material Nr. 5 **Autor: G. Oas**

Über den Missbrauch und Gebrauch der relativistischen Masse

[…]
Es gibt ein Konzept, das nicht nur in der kollektiven Denkweise von Laien verankert ist, sondern auch von vielen arbeitenden Physikern. Dies ist der Begriff der relativistischen Masse; die Masse eines sich bewegenden Objekts erhöht sich mit der Geschwindigkeit in Bezug auf einen Beobachter, der als ruhend angesehen wird.

$$m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

Über die Entscheidung, in pädagogischen Darstellungen die relativistische Masse einzuführen oder nicht, besteht noch keine allgemeine Zustimmung. Die Debatte über die Verwendung dieses Konzepts findet seit den frühen Tagen der Relativitätstheorie statt. Auf beiden Seiten des Problems gab es Befürworter, die darauf bestanden, dass ihre Ansicht die richtige sei. Einige haben sich auf historische Präzedenzfälle gestützt, als Begründung für eine Verwendung der relativistischen Masse.

> *Ob oder ob man nicht von einer geschwindigkeitsabhängigen Masse sprechen sollte, ist weitgehend eine Frage des Geschmacks. Auch wenn es momentan nicht zeitgemäß ist, haben Einstein und wir es auch getan.*
> [Sartori, L. (1996): *Understanding Relativity. A Simplified Approach to Einstein's Theories.* Berkeley: Univ. of Cal. Press. S. 212]

Sich auf solch eine umstrittene Geschichte zur Validierung zu verlassen, ist nicht nur pädagogisch verdächtig, sondern in diesem Fall inkorrekt; Einstein war *nicht* dafür, die relativistische Masse zu verwenden, außer in seinen frühesten Arbeiten. In der Tat wäre es schwierig, eine explizite Aussage über die relativistische Masse in Einsteins Werk nach seiner Arbeit von 1906 über die transversale und longitudinale Masse zu finden [A. Einstein, Ann. Phys. 21, 583 (1906)]. Später im Leben wandte er sich direkt in einem Brief an L. Barnett:

> *Es ist nicht gut, von der Masse $M = \frac{m}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$ eines bewegten Körpers zu sprechen, da für M keine klare Definition gegeben werden kann. Man beschränkt sich besser auf die ‚Ruhe-Masse' m. Daneben kann man ja den Ausdruck für Momentum und Energie geben, wenn man das Trägheitsverhalten rasch bewegter Körper angeben will.*
> [Brief von Einstein an Lincoln Barnett, 19. Juni 1948]

[…]

Die Vorstellung, dass die Wahl, ob eine relativistische Masse verwendet werden soll oder nicht, nur eine Frage des Geschmacks sei, betrachte ich als falsch: Die wahre Natur der speziellen Relativitätstheorie beruht auf der [vierdimensionalen] Geometrie (oder Kinematik).

> *In der Tat ist zu beachten, dass unabhängig davon, ob wir den Faktor* $1/\sqrt{1-v/c^2}$ *mit der Masse oder der Geschwindigkeit identifizieren, der Ursprung dieses Faktors bei Kollisionsmessungen kinematisch ist. Das heißt, er wird durch die Relativität der Zeitmessung verursacht.*
> [R. Resnick (1968): *Introduction to Special Reativity.* New York: John Wiley & Sons Inc. S. 19]

[…]

Mögliche Fehlvorstellungen

Das Konzept der relativistischen Masse wird dem Leser oft mit wenig oder gar keiner Begründung vorgelegt. Dies zwingt den Leser nicht nur dazu, es als glaubhaft zu akzeptieren, sondern hinterlässt einen Keim für Fehlvorstellungen, dass auch im Ruhesystem des Objekts die Masse zunimmt. Betrachten Sie den folgenden Text-Ausschnitt,

> […]
>
> *Je schneller sich etwas bewegt, desto mehr Energie hat es und anhand von Einsteins Formel sehen wir, dass umso mehr Energie etwas besitzt, desto massiver wird es. Myonen, die mit 99,9 Prozent der Lichtgeschwindigkeit reisen, wiegen beispielsweise viel mehr als ihre stationären Cousins. Tatsächlich sind sie buchstäblich ungefähr 22 mal so schwer.*
> [Greene, B. (1999): The Elegant Universe. New York: W. W. Norton. S. 52]

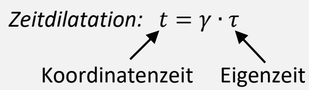
Die Implikation dieser Text-Passagen ist, dass das Objekt *buchstäblich* massiver wird. Diese Aussagen sind unbestimmt, da das Bezugssystem nicht angegeben ist. Das gilt nicht für alle Arbeiten, jedoch durchzieht diese Form der relativistischen Unbestimmtheit die Literatur. Für den Uneingeweihten kann diese Situation schwer zu erfassen sein - wie genau wird das Objekt massiver? Gibt es mehr Atome im Objekt? Wie misst man diese Erhöhung? Kann man sie überhaupt messen? Ohne weitere Erklärung bleibt ein physikalisches Bild übrig, das sich stark von dem unterscheidet, was der Autor beabsichtigt hat.“

Quelle: Oas, G. (2008): *On the abuse and use of relativistic mass*. arXiv:physics/0504110v2 [physics.ed-ph].

Material Nr. 6 **Autor: V. Petkov**

Hinweis für das Lesen des Materials:
Erläuterung zu den Begriffen Eigenzeit und Koordinatenzeit:
- Die Eigenzeit ist die Zeit im (mitbewegten) Ruhesystem, also die „Armbanduhrzeit".
- Die Koordinatenzeit ist die Zeit, die ein Beobachter für einen Vorgang in einem zu ihm relativ bewegten Bezugssystem misst.

Zeitdilatation: $t = \gamma \cdot \tau$



Relativität und die Natur der Raum-Zeit

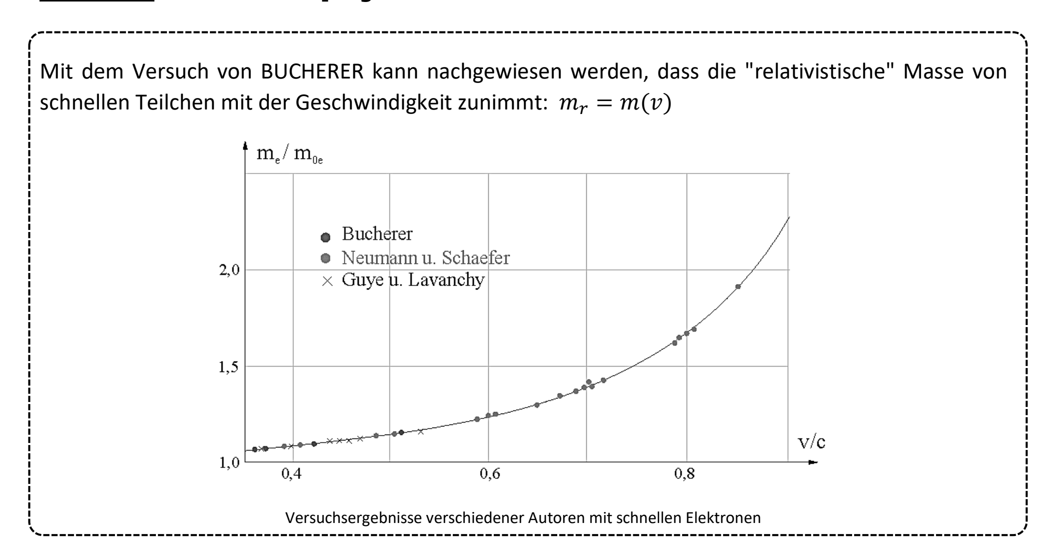
„Wenden wir uns nun der Frage nach der sogenannten relativistischen Zunahme der Masse zu, die in letzter Zeit kontrovers diskutiert wurde.
[...]
Die Situation ist jedoch genau die Gleiche, wie bei der Eigenzeit und der Koordinatenzeit. [...] Wenn wir nicht von der relativistischen Masse sprechen können, sollten wir mit dem gleichen Argument nur über die Eigenzeit sprechen, die eine Invariante ist, und der Koordinatenzeit die Bezeichnung "Zeit" verweigern. Die Eigenzeit ist eine Invariante, aber die Zeit kann sich auch relativistisch ändern. Das gilt auch für die Masse. Dies wird noch deutlicher mithilfe der Definition der Masse als Maß für den Widerstand, den ein Teilchen seiner Beschleunigung entgegensetzt, oder im Rahmen der Relativitätstheorie als Maß für den Widerstand, den ein Teilchen bietet, wenn es von seinem geodätischen Weg abweicht. Dieser Widerstand ist unterschiedlich in verschiedenen Bezugssystemen, in Bezug auf die sich das Teilchen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegt. Daher sollte sich die Partikelmasse auch in verschiedenen Bezugssystemen unterscheiden. Es sollte betont werden, dass der Widerstand im Teilchen entsteht, er stammt nicht von den geometrischen Eigenschaften der Raum-Zeit."

Quelle: Petkov, V. (2009): *Relativity and the nature of spacetime*. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer. S. 114, S. 115 f.

Material Nr. 7

Quelle: www.leifiphysik.de

Mit dem Versuch von BUCHERER kann nachgewiesen werden, dass die "relativistische" Masse von schnellen Teilchen mit der Geschwindigkeit zunimmt: $m_r = m(v)$



Versuchsergebnisse verschiedener Autoren mit schnellen Elektronen

Quelle: Verantwortlich: Andrea Pauline Martin (Joachim Herz Stiftung), Hamburg, URL: https://www.leifiphysik.de/relativitaetstheorie/spezielle-relativitaetstheorie/relativistische-masse-und-impuls, aufgerufen am 17.05.18 (Änderung: „dynamische Masse" zu „relativistische Masse")

Autoren: R. P. Bickerstaff, G. Patsakos

Wir haben bereits einen häufigen Fehler mit Gleichung $E = \gamma mc^2 = m_r c^2$ besprochen. Ein weiteres Beispiel wäre das berühmte Experiment (Kaufmann 1901, Bucherer 1909) über die Bewegung eines geladenen Teilchens in einem homogenen Magnetfeld. Die Formel für den Radius $R = \frac{p}{qB}$ der Kreisbahn gilt sowohl für relativistische als auch für nicht-relativistische Bewegungen. Messungen von R gegenüber der Geschwindigkeit v werden häufig als Nachweis für eine Zunahme der Masse mit der Geschwindigkeit angeführt. Tatsächlich ist alles, was die Experimente zeigen, dass p nicht linear von v abhängig ist, wenn sich v an c annähert. Wenn man möchte, kann man dies als eine Zunahme von m_r *interpretieren*; oder man kann es einfach als Nachweis für den γ Faktor in Gleichung $p = \gamma mv$ ansehen.

Quelle: Bickerstaff, R. P. & Patsakos, G. (1995): *Relativistic generalizations of mass*. In: European Journal of Physics **16,** 63

A.3 Fragebogen 2

Fragebogen (Aufgaben nach dem Lesen)

1. Kreuzen Sie für die folgende Aussage an, welcher Antwort Sie am ehesten zustimmen.

   Aussage: *In der Speziellen Relativitätstheorie gilt, dass die Masse eines Teilchens mit seiner Geschwindigkeit zunimmt. D.h. die Masse ist abhängig vom Bezugssystem, also nicht invariant.*

   Antwort: ☐ *wahr* ☐ *falsch* ☐ *unentschieden*

2. Begründen Sie, weshalb Sie zu Ihrer Einschätzung in 1. (angekreuzte Antwort) gelangen. (Bitte die extra-Blätter zum Schreiben verwenden)

3. Sie planen eine Unterrichtsstunde im Leistungskurs der Jahrgangsstufe 11 zum Thema: *„Masse in der Speziellen Relativitätstheorie“* (Lernbereich 6: *Einblick in die Relativitätstheorie,* siehe unten)

   Geben Sie wesentliche Lernziele (möglichst konkret) an, die Sie in dieser Unterrichtsstunde verfolgen würden. (Bitte die extra-Blätter zum Schreiben verwenden)

Lernbereich 6: Einblick in die Relativitätstheorie	**8 Ustd.**
Kennen der Postulate und grundlegender Aussagen der Speziellen Relativitätstheorie	Satellitennavigationssysteme
- klassisches Relativitätsprinzip	Begriff Inertialsystem; Galilei-Transformation
- Michelson-Experiment	
- Relativitätsprinzip	Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit
- Relativität der Gleichzeitigkeit	Experimente mit bewegten Atomuhren
- Zeitdilatation	
- Längenkontraktion	Myonenzerfall, Raumzeit
- Relativität der Masse	klassische Mechanik als Sonderfall der Speziellen Relativitätstheorie
- Äquivalenz von Masse und Energie $E = m \cdot c^2$	
Einblick gewinnen in ausgewählte Aussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie	Gravitation und gekrümmte Raumzeit; Experimente mit Atomuhren; schwarze Löcher im Kosmos; Theorie des Urknalls ➔ RE/e, Lk 12, LB 2

Sächsisches Staatsministerium für Kultus und Sport (Hrsg.): *Lehrplan Gymnasium. Physik. 2004/2007/2009/2011.* S. 47

A.4 Textvignetten

Situation 1

Im Physikvorbereitungszimmer unterhalten Sie sich mit einer befreundeten Physiklehrkraft, die derzeit im Leistungskurs der Jahrgangsstufe 11 den Lernbereich 6: *Einblick in die Relativitätstheorie* unterrichtet.

Physiklehrkraft (Kollege/Kollegin):

> *„Ich muss dir was erzählen. Neulich habe ich in einem Fachbuch gelesen, dass auch in der Speziellen Relativitätstheorie die Masse nicht von der Geschwindigkeit eines Körpers abhängt. Deshalb stand in dem Buch, dass der Autor auch nicht den Ausdruck* $\gamma \cdot m_0$ *und den Begriff »relativistische Masse« verwendet. In unserem Lehrbuch für den Leistungskurs steht es ja genau anders, dass die Masse mit der Geschwindigkeit zunimmt.*
> *Ich weiß jetzt gar nicht, was richtig ist. Aber ich finde, wenn es dazu widersprüchliche Aussagen in Fachbüchern gibt, dann sollten wir als Lehrer solche Themen gar nicht unterrichten müssen! Das nützt den Schülern doch gar nichts.* ***Findest du das nicht auch etwas kritisch?***
> *Morgen habe ich wieder zwei Stunden im Leistungskurs und wollte eigentlich über die geschwindigkeitsabhängige Masse sprechen.* ***Und wie soll ich das nun im Unterricht behandeln? Was würdest du denn machen?*** *Ich wünschte, ich könnte das Thema mit der Masse einfach weglassen."*

Aufgabe:
Formulieren Sie für Ihre/n Kollegin/en eine Antwort auf die ***Fragen***, in der Sie sich begründet zu den Gedanken der/des Kollegin/en positionieren.

Situation 2A

Sie unterrichten in einem Leistungskurs der Jahrgangsstufe 11 den Lernbereich 6: *Einblick in die Relativitätstheorie* (siehe unten: Ausschnitt aus dem Lehrplan).

Lernbereich 6: Einblick in die Relativitätstheorie	**8 Ustd.**
Kennen der Postulate und grundlegender Aussagen der Speziellen Relativitätstheorie	Satellitennavigationssysteme
- klassisches Relativitätsprinzip	Begriff Inertialsystem; Galilei-Transformation
- Michelson-Experiment	
- Relativitätsprinzip	Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit
- Relativität der Gleichzeitigkeit	Experimente mit bewegten Atomuhren
- Zeitdilatation	
- Längenkontraktion	Myonenzerfall, Raumzeit
- Relativität der Masse	klassische Mechanik als Sonderfall der Speziellen Relativitätstheorie
- Äquivalenz von Masse und Energie $E = m \cdot c^2$	
Einblick gewinnen in ausgewählte Aussagen der Allgemeinen Relativitätstheorie	Gravitation und gekrümmte Raumzeit; Experimente mit Atomuhren; schwarze Löcher im Kosmos; Theorie des Urknalls ➔ RE/e, Lk 12, LB 2

Sächsisches Staatsministerium für Kultus und Sport (Hrsg.): *Lehrplan Gymnasium. Physik. 2004/2007/2009/2011.* S. 47

Als vorbereitende Hausaufgabe für Ihre Unterrichtsstunde zum Thema „*Masse in der Speziellen Relativitätstheorie*“ haben Sie den Schüler/innen folgende Aufgabe erteilt:
Recherchiert zur Masse in der Speziellen Relativitätstheorie.

Zu Beginn Ihrer Unterrichtsstunde präsentieren zwei Schüler/innen (S1 und S2) ihre Rechercheergebnisse zu dieser Hausaufgabe mündlich im Leistungskurs:

S1: *„Ich habe herausgefunden, dass nicht nur Zeit und Länge, sondern auch die Masse vom Bezugssystem, also von der Geschwindigkeit abhängt und nicht konstant ist. Die Masse eines Objekts nimmt zu, wenn es sich relativ zu mir mit sehr großer Geschwindigkeit bewegt. Darum spricht man von »relativistischer Masse«. Ein Teilchen im Teilchenbeschleuniger wiegt also mehr. Man kann diese größere Masse sogar berechnen mit* $\gamma \cdot m_0$*.“*

S2: *„Das hab ich ganz anders als S1. Ich habe gelesen, dass man den Begriff »relativistische Masse« eigentlich nicht benutzen sollte. Es gibt auch keine zwei unterschiedlichen Massen, also »Ruhemasse« und »relativistische Masse« oder so was, sondern einfach nur EINE »Masse«, die immer gleich groß ist, egal wie schnell sich ein Körper bewegt. Die Masse eines Teilchens verändert sich also gar nicht. Sie bleibt immer gleich groß und ist nicht abhängig vom Bezugssystem.“*

Aufgabe:
Beschreiben und begründen Sie, wie Sie in dieser Situation reagieren bzw. was Sie sagen würden.

Situation 2B

Stellen Sie sich vor, dass Sie noch nicht wie in Situation 2A reagiert haben und sich stattdessen die folgenden Schülerkommentare direkt an die Beiträge von S1 und S2 in Situation 2A anschließen:

S1: *„Also ich hab das so aus unserem neuen Lehrbuch, dass die Masse mit der Geschwindigkeit zunimmt. Ist das jetzt etwa nicht richtig?“*

S2: *„Ich hab das so im Internet gelesen, dass sich die Masse auch in der Relativitätstheorie, bei hohen Geschwindigkeiten, nicht verändert.“*

S3: *„Hm, vielleicht ist das noch nicht abschließend in der Physik geklärt. Dauert halt noch ein bisschen, bis man irgendwann eine feste Antwort geben kann.“*

S4: *„Ja, also es muss ja eine sichere Antwort auf diese Frage geben: Also ist die Masse nun immer gleich groß oder hängt sie von der Geschwindigkeit ab? Schließlich ist die Physik doch eine Naturwissenschaft!“*

Aufgabe:
Beschreiben und begründen Sie, wie Sie in dieser Situation auf die obigen Beiträge der Schüler/innen reagieren bzw. was Sie sagen würden.

Situation 3

Tim Schmidt ist ein Schüler Ihres Physik-Leistungskurses.
Sie erhalten die folgende E-Mail von Tims Eltern.

> Sehr geehrte/r Frau/Herr … [Ihr Name],
>
> bei uns zu Hause herrscht große Verwirrung zwischen unseren Zwillingen Tim und Tom. Beide besuchen die Physikleistungskurse an Ihrer Schule (Tom ist im anderen Leistungskurs bei Herrn Meyer). Offensichtlich besteht keine Einigkeit in Ihrer Schule über einige fachliche Inhalte, was wir als unhaltbar empfinden. Tim und Tom waren am Wochenende völlig verwirrt, als sie beim Lernen für Physik über die Frage nach der Masse in der Speziellen Relativitätstheorie ins Gespräch kamen. Beide konnten sich offensichtlich nicht darüber einigen, ob die Masse mit der Geschwindigkeit eines Objektes zunimmt oder nicht, da Sie und Herr Meyer hierzu scheinbar widersprüchliche Meinungen in Ihrem Unterricht vertreten.
> Sicherlich ist das Thema „Spezielle Relativitätstheorie" auch für Lehrer/innen in der Schule kein leicht verständlicher Stoff, jedoch bitten wir darum, dass Sie dieses Problem kompetent klären, damit die Schüler fachlich korrekt unterrichtet werden und sie auch in Klausuren oder gar dem Abitur die gleichen Chancen haben.
>
> Mit freundlichen Grüßen
>
> Familie Schmidt

Anlässlich dieser E-Mail laden Sie Frau und Herrn Schmidt zu einem Elterngespräch in die Schule ein.
Zu Beginn des Gesprächs fragt Sie Frau Schmidt:

> *„Was sagen Sie zu der Problematik, die wir Ihnen in unserer E-Mail beschrieben haben und was gedenken Sie diesbezüglich zu tun?"*

Aufgaben:
Formulieren Sie eine Antwort auf diese Frage von Frau Schmidt, in der Sie sich begründet zum Inhalt der E-Mail positionieren.

A.5 Entwicklung der Textvignetten

A.5.1 Einschätzungsbogen zur Bewertung der Konstruktionskriterien für die Textvignetten in der 2. Expertenbefragung

Textvignette 1: Gespräch mit Kollege/in

Die Vignette stellt eine Situation dar, in der sich die Teilnehmer/innen entscheiden oder positionieren müssen (**Entscheidungs-** bzw. **Beurteilungssituation**).					
trifft voll und ganz zu	trifft überwiegend zu	trifft gerade noch zu	trifft eher nicht zu	trifft überwiegend nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
Die Vignette versetzt die Teilnehmer/innen in eine **komplexe** Situationen.					
trifft voll und ganz zu	trifft überwiegend zu	trifft gerade noch zu	trifft eher nicht zu	trifft überwiegend nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
Die Vignette versetzt die Teilnehmer/innen in eine **authentische, praxisnahe** (Schulkontext) Situation.					
trifft voll und ganz zu	trifft überwiegend zu	trifft gerade noch zu	trifft eher nicht zu	trifft überwiegend nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
Die Vignette ist **professionsbezogen**. (D.h. die Vignette bezieht sich in einem nicht zu weiten Sinn auf den Unterricht.)					
trifft voll und ganz zu	trifft überwiegend zu	trifft gerade noch zu	trifft eher nicht zu	trifft überwiegend nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
Die Vignette stellt eine in sich **abgeschlossene** Situation dar.					
trifft voll und ganz zu	trifft überwiegend zu	trifft gerade noch zu	trifft eher nicht zu	trifft überwiegend nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
Die Vignette ist möglichst **kurz**, jedoch **hinreichend detailliert**.					
trifft voll und ganz zu	trifft überwiegend zu	trifft gerade noch zu	trifft eher nicht zu	trifft überwiegend nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
Die Vignette stellt **keine** Situation dar, die in der **Vergangenheit** liegt.					
trifft voll und ganz zu	trifft überwiegend zu	trifft gerade noch zu	trifft eher nicht zu	trifft überwiegend nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
Die Vignette regt die Teilnehmer/innen dazu an, eine **konkrete Reaktion** (Handlungsmöglichkeit bzw. Antwort) zu beschreiben.					
trifft voll und ganz zu	trifft überwiegend zu	trifft gerade noch zu	trifft eher nicht zu	trifft überwiegend nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
Die Vignette fordert die Teilnehmer/innen dazu auf, die genannte Reaktion (Handlungsmöglichkeit bzw. Antwort) zu **begründen**.					
trifft voll und ganz zu	trifft überwiegend zu	trifft gerade noch zu	trifft eher nicht zu	trifft überwiegend nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
Die Vignette ermöglicht den Teilnehmer/innen **Offenheit** in Bezug auf Handlungs- bzw. Antwortmöglichkeiten (mehrere verschiedene Reaktionen sind denkbar).					
trifft voll und ganz zu	trifft überwiegend zu	trifft gerade noch zu	trifft eher nicht zu	trifft überwiegend nicht zu	trifft überhaupt nicht zu

Textvignette 2A: Schülerergebnisse Hausaufgabe

Die Vignette stellt eine Situation dar, in der sich die Teilnehmer/innen entscheiden oder positionieren müssen (**Entscheidungs-** bzw. **Beurteilungssituation**).					
trifft voll und ganz zu	trifft überwiegend zu	trifft gerade noch zu	trifft eher nicht zu	trifft überwiegend nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
Die Vignette versetzt die Teilnehmer/innen in eine **komplexe** Situationen.					
trifft voll und ganz zu	trifft überwiegend zu	trifft gerade noch zu	trifft eher nicht zu	trifft überwiegend nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
Die Vignette versetzt die Teilnehmer/innen in eine **authentische, praxisnahe** (Schulkontext) Situation.					
trifft voll und ganz zu	trifft überwiegend zu	trifft gerade noch zu	trifft eher nicht zu	trifft überwiegend nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
Die Vignette ist **professionsbezogen**. (D.h. die Vignette bezieht sich in einem nicht zu weiten Sinn auf den Unterricht.)					
trifft voll und ganz zu	trifft überwiegend zu	trifft gerade noch zu	trifft eher nicht zu	trifft überwiegend nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
Die Vignette stellt eine in sich **abgeschlossene** Situation dar.					
trifft voll und ganz zu	trifft überwiegend zu	trifft gerade noch zu	trifft eher nicht zu	trifft überwiegend nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
Die Vignette ist möglichst **kurz**, jedoch **hinreichend detailliert**.					
trifft voll und ganz zu	trifft überwiegend zu	trifft gerade noch zu	trifft eher nicht zu	trifft überwiegend nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
Die Vignette stellt **keine** Situation dar, die in der **Vergangenheit** liegt.					
trifft voll und ganz zu	trifft überwiegend zu	trifft gerade noch zu	trifft eher nicht zu	trifft überwiegend nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
Die Vignette regt die Teilnehmer/innen dazu an, eine **konkrete Reaktion** (Handlungsmöglichkeit bzw. Antwort) zu beschreiben.					
trifft voll und ganz zu	trifft überwiegend zu	trifft gerade noch zu	trifft eher nicht zu	trifft überwiegend nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
Die Vignette fordert die Teilnehmer/innen dazu auf, die genannte Reaktion (Handlungsmöglichkeit bzw. Antwort) zu **begründen**.					
trifft voll und ganz zu	trifft überwiegend zu	trifft gerade noch zu	trifft eher nicht zu	trifft überwiegend nicht zu	trifft überhaupt nicht zu
Die Vignette ermöglicht den Teilnehmer/innen **Offenheit** in Bezug auf Handlungs- bzw. Antwortmöglichkeiten (mehrere verschiedene Reaktionen sind denkbar).					
trifft voll und ganz zu	trifft überwiegend zu	trifft gerade noch zu	trifft eher nicht zu	trifft überwiegend nicht zu	trifft überhaupt nicht zu

Vignette 2B: Schülergespräch im Unterricht

<table>
<tr><td colspan="6">Die Vignette stellt eine Situation dar, in der sich die Teilnehmer/innen entscheiden oder positionieren müssen (Entscheidungs- bzw. Beurteilungssituation).</td></tr>
<tr><td>trifft voll und ganz zu</td><td>trifft überwiegend zu</td><td>trifft gerade noch zu</td><td>trifft eher nicht zu</td><td>trifft überwiegend nicht zu</td><td>trifft überhaupt nicht zu</td></tr>
<tr><td colspan="6">Die Vignette versetzt die Teilnehmer/innen in eine komplexe Situationen.</td></tr>
<tr><td>trifft voll und ganz zu</td><td>trifft überwiegend zu</td><td>trifft gerade noch zu</td><td>trifft eher nicht zu</td><td>trifft überwiegend nicht zu</td><td>trifft überhaupt nicht zu</td></tr>
<tr><td colspan="6">Die Vignette versetzt die Teilnehmer/innen in eine authentische, praxisnahe (Schulkontext) Situation.</td></tr>
<tr><td>trifft voll und ganz zu</td><td>trifft überwiegend zu</td><td>trifft gerade noch zu</td><td>trifft eher nicht zu</td><td>trifft überwiegend nicht zu</td><td>trifft überhaupt nicht zu</td></tr>
<tr><td colspan="6">Die Vignette ist professionsbezogen. (D.h. die Vignette bezieht sich in einem nicht zu weiten Sinn auf den Unterricht.)</td></tr>
<tr><td>trifft voll und ganz zu</td><td>trifft überwiegend zu</td><td>trifft gerade noch zu</td><td>trifft eher nicht zu</td><td>trifft überwiegend nicht zu</td><td>trifft überhaupt nicht zu</td></tr>
<tr><td colspan="6">Die Vignette stellt eine in sich abgeschlossene Situation dar.</td></tr>
<tr><td>trifft voll und ganz zu</td><td>trifft überwiegend zu</td><td>trifft gerade noch zu</td><td>trifft eher nicht zu</td><td>trifft überwiegend nicht zu</td><td>trifft überhaupt nicht zu</td></tr>
<tr><td colspan="6">Die Vignette ist möglichst kurz, jedoch hinreichend detailliert.</td></tr>
<tr><td>trifft voll und ganz zu</td><td>trifft überwiegend zu</td><td>trifft gerade noch zu</td><td>trifft eher nicht zu</td><td>trifft überwiegend nicht zu</td><td>trifft überhaupt nicht zu</td></tr>
<tr><td colspan="6">Die Vignette stellt keine Situation dar, die in der Vergangenheit liegt.</td></tr>
<tr><td>trifft voll und ganz zu</td><td>trifft überwiegend zu</td><td>trifft gerade noch zu</td><td>trifft eher nicht zu</td><td>trifft überwiegend nicht zu</td><td>trifft überhaupt nicht zu</td></tr>
<tr><td colspan="6">Die Vignette regt die Teilnehmer/innen dazu an, eine konkrete Reaktion (Handlungsmöglichkeit bzw. Antwort) zu beschreiben.</td></tr>
<tr><td>trifft voll und ganz zu</td><td>trifft überwiegend zu</td><td>trifft gerade noch zu</td><td>trifft eher nicht zu</td><td>trifft überwiegend nicht zu</td><td>trifft überhaupt nicht zu</td></tr>
<tr><td colspan="6">Die Vignette fordert die Teilnehmer/innen dazu auf, die genannte Reaktion (Handlungsmöglichkeit bzw. Antwort) zu begründen.</td></tr>
<tr><td>trifft voll und ganz zu</td><td>trifft überwiegend zu</td><td>trifft gerade noch zu</td><td>trifft eher nicht zu</td><td>trifft überwiegend nicht zu</td><td>trifft überhaupt nicht zu</td></tr>
<tr><td colspan="6">Die Vignette ermöglicht den Teilnehmer/innen Offenheit in Bezug auf Handlungs- bzw. Antwortmöglichkeiten (mehrere verschiedene Reaktionen sind denkbar).</td></tr>
<tr><td>trifft voll und ganz zu</td><td>trifft überwiegend zu</td><td>trifft gerade noch zu</td><td>trifft eher nicht zu</td><td>trifft überwiegend nicht zu</td><td>trifft überhaupt nicht zu</td></tr>
</table>

Vignette 3: E-Mail von Eltern

<table>
<tr><td colspan="6">Die Vignette stellt eine Situation dar, in der sich die Teilnehmer/innen entscheiden oder positionieren müssen (Entscheidungs- bzw. Beurteilungssituation).</td></tr>
<tr><td>trifft voll und ganz zu</td><td>trifft überwiegend zu</td><td>trifft gerade noch zu</td><td>trifft eher nicht zu</td><td>trifft überwiegend nicht zu</td><td>trifft überhaupt nicht zu</td></tr>
<tr><td colspan="6">Die Vignette versetzt die Teilnehmer/innen in eine komplexe Situationen.</td></tr>
<tr><td>trifft voll und ganz zu</td><td>trifft überwiegend zu</td><td>trifft gerade noch zu</td><td>trifft eher nicht zu</td><td>trifft überwiegend nicht zu</td><td>trifft überhaupt nicht zu</td></tr>
<tr><td colspan="6">Die Vignette versetzt die Teilnehmer/innen in eine authentische, praxisnahe (Schulkontext) Situation.</td></tr>
<tr><td>trifft voll und ganz zu</td><td>trifft überwiegend zu</td><td>trifft gerade noch zu</td><td>trifft eher nicht zu</td><td>trifft überwiegend nicht zu</td><td>trifft überhaupt nicht zu</td></tr>
<tr><td colspan="6">Die Vignette ist professionsbezogen. (D.h. die Vignette bezieht sich in einem nicht zu weiten Sinn auf den Unterricht.)</td></tr>
<tr><td>trifft voll und ganz zu</td><td>trifft überwiegend zu</td><td>trifft gerade noch zu</td><td>trifft eher nicht zu</td><td>trifft überwiegend nicht zu</td><td>trifft überhaupt nicht zu</td></tr>
<tr><td colspan="6">Die Vignette stellt eine in sich abgeschlossene Situation dar.</td></tr>
<tr><td>trifft voll und ganz zu</td><td>trifft überwiegend zu</td><td>trifft gerade noch zu</td><td>trifft eher nicht zu</td><td>trifft überwiegend nicht zu</td><td>trifft überhaupt nicht zu</td></tr>
<tr><td colspan="6">Die Vignette ist möglichst kurz, jedoch hinreichend detailliert.</td></tr>
<tr><td>trifft voll und ganz zu</td><td>trifft überwiegend zu</td><td>trifft gerade noch zu</td><td>trifft eher nicht zu</td><td>trifft überwiegend nicht zu</td><td>trifft überhaupt nicht zu</td></tr>
<tr><td colspan="6">Die Vignette stellt keine Situation dar, die in der Vergangenheit liegt.</td></tr>
<tr><td>trifft voll und ganz zu</td><td>trifft überwiegend zu</td><td>trifft gerade noch zu</td><td>trifft eher nicht zu</td><td>trifft überwiegend nicht zu</td><td>trifft überhaupt nicht zu</td></tr>
<tr><td colspan="6">Die Vignette regt die Teilnehmer/innen dazu an, eine konkrete Reaktion (Handlungsmöglichkeit bzw. Antwort) zu beschreiben.</td></tr>
<tr><td>trifft voll und ganz zu</td><td>trifft überwiegend zu</td><td>trifft gerade noch zu</td><td>trifft eher nicht zu</td><td>trifft überwiegend nicht zu</td><td>trifft überhaupt nicht zu</td></tr>
<tr><td colspan="6">Die Vignette fordert die Teilnehmer/innen dazu auf, die genannte Reaktion (Handlungsmöglichkeit bzw. Antwort) zu begründen.</td></tr>
<tr><td>trifft voll und ganz zu</td><td>trifft überwiegend zu</td><td>trifft gerade noch zu</td><td>trifft eher nicht zu</td><td>trifft überwiegend nicht zu</td><td>trifft überhaupt nicht zu</td></tr>
<tr><td colspan="6">Die Vignette ermöglicht den Teilnehmer/innen Offenheit in Bezug auf Handlungs- bzw. Antwortmöglichkeiten (mehrere verschiedene Reaktionen sind denkbar).</td></tr>
<tr><td>trifft voll und ganz zu</td><td>trifft überwiegend zu</td><td>trifft gerade noch zu</td><td>trifft eher nicht zu</td><td>trifft überwiegend nicht zu</td><td>trifft überhaupt nicht zu</td></tr>
</table>

A.5.2 Einschätzung der Textvignetten in der 2. Expertenbefragung anhand der Konstruktionskriterien

Tabelle A.1: Mittelwerte der Einschätzung der Textvignetten anhand der Konstruktionskriterien ($N = 7$)

Konstruktions- kriterium	Vignette 1	Vignette 2A	Vignette 2B	Vignette 3
Entscheidungs- bzw. Beurteilungs-situation	5,9	5,4	5,1	5,9
komplexe Situation	5,0	5,5	6,0	5,8
authentische, praxisnahe Situation	5,7	5,7	5,7	5,3
professionsbezogen	5,9	6,0	5,7	5,9
abgeschlossene Situation	5,3	5,6	5,4	5,8
kurz, jedoch hinreichend detailliert	5,9	5,6	5,7	5,7
nicht in der Vergangenheit	6,0	6,0	5,9	5,4
anregend, konkrete Reaktion zu beschreiben	5,7	5,9	5,9	5,9
Aufforderung, zu begründen	5,9	6,0	6,0	6,0
Offenheit	5,9	6,0	5,9	6,0

Legende:
6 = trifft voll und ganz zu
5 = trifft überwiegend zu
4 = trifft gerade noch zu
3 = trifft eher nicht zu
2 = trifft überwiegend nicht zu
1 = trifft überhaupt nicht zu

A.5.3 Beschreibung einzelner Kompetenzaspekte des Modells professioneller Handlungskompetenz

1. Professionswissen

1.1 Pädagogisches Wissen

- Konzeptuelles bildungswissenschaftl. Grundlagenwissen: erziehungsphilosophische/bildungstheoretische/ Grundlagen von Schule/Unterricht, Psychologie der menschlichen Entwicklung/des Lernens/der Motivation, individuelle Lernprozesse und Besonderheiten der Schüler
- Allgemeindid. Konzeptions- und Planungswissen: Prinzipien der Unterrichtsplanung; Motivationsarten, Unterrichtsmethoden im weiten Sinne, Aufgabentypen kennen, Merkmale guten Unterrichts
- Unterrichtsführung und Orchestrierung von Lerngelegenheiten: effektive Klassenführung (classroom management, z.B.: Umgang mit Disziplinproblemen, Regelklarheit, Störungsprävention); Sicherung einer konstruktiv-unterstützenden Lernumgebung (Klassenraummanagement)
- Leistungsbeurteilung: Leistungsnormen Zielen zuordnen, problematische Situationen in Bezug auf Gütekriterien erkennen

1.2 Fachwissen

- versch. Niveaustufen in COACTIV: Alltagswissen, Beherrschung des Schulstoffes, tieferes Verständnis der Fachinhalte des Curriculums der Sekundarstufe, reines Universitätswissen (losgelöst vom Schulcurriculum)
- Lehrpersonen sollten tieferes Verständnis der fachl. Inhalte haben; dazu gehört auch: Überlegungen zu Fragen der Bedeutung, der Genese und Verwendung fachlicher Begriffe
- Kognitive Aktivitäten:
  - Reproduzieren (Wissenswiedergabe, einfache Anwendungen)
  - Verstehen (Vernetzen, komplexe Anwendungen, konzeptuales Verständnis, Zushg./Analogien herstellen, Begründungen)
  - Beurteilen (fachl. Beurteilen, Argumentieren, Interpretieren, Analysieren)

1.3 Fachdidaktisches Wissen

- Wissen über Schülervorstellungen und fachbezogene Schülerkonzepte und Lernschwierigkeiten
- Wissen über versch. Darstellungs- u. Erklärungsmöglichkeiten (Inhalte sach-, adressaten- u. zielgerecht erklären können) und fachliche Lehrstrategien, Elementarisierungen
- Wissen/Überzeugungen zu Unterrichtszielen im Physikunterricht
- Wissen über (allg.) Aspekte physikalischer Lernprozesse: Lernkonzepte (Konzeptwechsel, Konstruktivismus)
- Gestaltung und Planung von Lernprozessen: Inhalte Auswählen, Fragestellungen/ Sachverhalte hinsichtlich didaktischer und curricularen Relevanz einordnen, fachlich konsistentes Vorgehen, Verdeutlichung der Sinnhaftigkeit des Vorgehens, motivierende/verständliche Lernumgebungen/ Arbeitsmaterialien schaffen, Strukturierung von Inhalten u. Aktivitäten, Nutzung geeigneter Arbeitsformen
- Beurteilung, Analyse u. Reflexion von Lernprozessen: Bewertung von Schülerantworten, Verständnis der Schüler/innen schon im Lernprozess prüfen können, Einschätzen von Lernschwierigkeiten und Diagnose von Schülerkonzepten u. Fehlern, Analyse von Lernprozessen
- adäquate Reaktion in kritischen Situationen: Nutzung vernetzten fachdidaktischen Wissens bei der Bewältigung kritischer Situationen im Physikunterricht, Verständnis- u. selbständigkeitsorientierte Reaktion, Umgang mit Fehlern/Schülerkonzepten/ ungewünschten Experimentierergebnissen, Nutzung didaktischer Chancen
- Kennen konkreter Interessensbereiche, Möglichkeiten der Motivation, Kennen realer Anwendungsbereiche
- Aufgaben: Wissen über didaktisches u. diagnostisches Potenzial, kognitive Anforderungen u. Vorwissen
- Wissen über den Einsatz von Experimenten

2. Überzeugungen (beliefs)/Werthaltungen

2.1 Wertbindungen

- Berufsethik mit zentraler Orientierungsfunktion
- Berufsmoral von Lehrkräften nach Oser (1998): Verpflichtung auf:
  - Fürsorge: kann sowohl Nachsicht (Fördern) als auch Voraussicht (Fordern) bedeuten
  - Gerechtigkeit: unterschiedliche Gesichtspunkte der Verteilungsgerechtigkeit sind gleichermaßen zu berücksichtigen: Gleichheit, Billigkeit, Reziprozität und Leistung
  - Wahrhaftigkeit
- Fächerübergreifende Beliefs zur Lehrerrolle und zur Rolle von Schule

2.2 Epistemologische Überzeugungen

- wissenschaftstheoretische Beliefs zur Natur der akademischen Disziplin des Unterrichtsfaches
- Vorstellungen und subjektive Theorien, die Personen über Wissen und Wissenserwerb generell oder in spezifischen Domänen entwickeln
- Subjektive Überzeugungen über Struktur, Verlässlichkeit, Genese, Validierung und Rechtfertigung von Wissensbeständen
- diese intuitiven Theorien strukturieren die Art der Begegnung mit der erkennbaren Welt vor → sie beeinflussen Denken und Schlussfolgern, Informationsverarbeitung, Lernen und Motivation

2.3 Subjektive Theorien über Lehren und Lernen

- z.B. Vorstellungen zur Veränderbarkeit von Intelligenz
- konstruktivistisches bzw. rezeptives Lernverständnis (lerntheoret. Orientierungen)
- Subjektive Theorien, die Lehrpersonen über das Lehren und Lernen haben beeinflussen: ihre allgemeinen Zielvorstellungen (für ihren Unterricht), Wahrnehmung und Deutung von Unterrichtssituationen, die an Schüler gerichteten Erwartungen

2.4 Zielsysteme für Curriculum und Unterricht

- Ziele haben auch im Prozessgeschehen eine regulative Funktion
- Zielpräferenzen scheinen auch auf überindividueller Ebene in der Kultur von Fächern und Lehrerbildungstraditionen institutionalisiert zu sein

3. Motivationale Orientierungen und selbstregulative Fähigkeiten

3.1 Kontrollüberzeugungen und Selbstwirksamkeitserwartungen

- Selbstwirksamkeit: (subjektive) Überzeugung einer Person, über Fähigkeiten/Mittel zu verfügen, um diejenigen Handlungen durchführen zu können, um definiertes Ziel zu erreichen (auch wenn Barrieren zu überwinden sind)
- Selbstwirksamkeitserwartungen: Selbsteinschätzung einer Person darüber, ob und wie stark eine bestimmte Kompetenz (Sinne einer Disposition, bestimmte Handlungen erfolgreich zu vollziehen,) bei ihr ausgeprägt ist. Damit entspringen SWE subjektiven Wahrnehmungen und Einschätzungen und machen keine Aussage über tatsachlich vorhandene Fähigkeiten
- Selbstwirksamkeitserwartungen regulieren: Zielsetzung des Handelns/Anspruchsniveau, Anstrengung/Persistenz, Abschirmung gegen konkurrierende Intentionen, Verarbeitung von Erfolg/Misserfolg

3.2 Intrinsische motivationale Orientierung: Lehrerenthusiasmus

Enthusiasmus und Engagement im Unterricht:

- Enthusiasmus als instrumentell-strategisches Verhalten im Klassenzimmer, zur Sicherung der Schülermotivation (man nimmt an, dass Lehrerengagement Modellwirkung für das Verhalten der Schüler hat)
- Lehrerenthusiasmus als Personenmerkmal, als Komponente einer intrinsischen motivationalen Orientierung, bezeichnet den Grad des positiven emotionalen Erlebens während der Ausübung der Tätigkeit

3.3 Selbstregulation: Engagement und Distanzierungsfähigkeit

- Belastungserleben und Resilienzfaktoren im Lehrerberuf
- Umgang mit den eigenen persönlichen Ressourcen, effektiver Umgang mit den Herausforderungen professioneller Arbeitssituationen
- subjektiv erlebte Belastung, die Kombination von hohem Engagement und Distanzierungsfähigkeit als wichtige persönliche Ressource

Auflistung erstellt nach:

Baumert und Kunter 2006, Borowski et al. 2010, Brovelli et al. 2013, Rabe, Meinhardt und Krey 2012, Riese 2009, Tepner et al. 2012

A.5.4 Einschätzung der Komplexität der Textvignetten in der 2. Expertenbefragung

Tabelle A.2: Zuordnung von Kompetenzaspekten (nach dem Modell professioneller Handlungskompetenz) für Textvignette 1 (Zutreffendes grau)

Professionswissen	**Zuordnungsvorlage**	**Experte 1**	**Experte 2**	**Experte 3**	**Experte 4**
pädagogisches Wissen					
Fachwissen	■	■	■	■	
fachdidaktisches Wissen	■	■	■	■	■
Überzeugungen (beliefs) / Werthaltungen					
Wertbindungen	■	■	■		■
epistemologische Überzeugungen	■	■	■	■	■
subjektive Theorien					■
Zielsysteme für Curriculum und Unterricht	■	■	■	■	■
motivationale Orientierungen und selbstregulative Fähigkeiten					
Kontrollüberzeugungen und Selbstwirksamkeitserwartungen	■		■		■
intrinsische motivationale Orientierungen: Lehrerenthusiasmus			■		
Selbstregulation: Engagement und Distanzierungsfähigkeit	■	■	■	■	

Tabelle A.3: Zuordnung von Kompetenzaspekten (nach dem Modell professioneller Handlungskompetenz) für Textvignette 2A (Zutreffendes grau)

Professionswissen	**Zuordnungsvorlage**	**Experte 1**	**Experte 2**	**Experte 3**	**Experte 4**
pädagogisches Wissen	■	■	■	■	
Fachwissen	■	■	■	■	■
fachdidaktisches Wissen	■	■	■	■	■
Überzeugungen (beliefs) / Werthaltungen					
Wertbindungen		■		■	
epistemologische Überzeugungen	■	■	■	■	■
subjektive Theorien	■		■		
Zielsysteme für Curriculum und Unterricht	■	■	■		■
motivationale Orientierungen und selbstregulative Fähigkeiten					
Kontrollüberzeugungen und Selbstwirksamkeitserwartungen	■	■		■	■
intrinsische motivationale Orientierungen: Lehrerenthusiasmus	■				
Selbstregulation: Engagement und Distanzierungsfähigkeit	■			■	

Tabelle A.4: Zuordnung von Kompetenzaspekten (nach dem Modell professioneller Handlungskompetenz) für Textvignette 2B (Zutreffendes grau)

Professionswissen	**Zuordnungsvorlage**	**Experte 1**	**Experte 2**	**Experte 3**	**Experte 4**
pädagogisches Wissen	■	■	■	■	■
Fachwissen	■	■	■	■	■
fachdidaktisches Wissen	■	■	■	■	■
Überzeugungen (beliefs) / Werthaltungen					
Wertbindungen		■			
epistemologische Überzeugungen	■	■	■	■	■
subjektive Theorien	■				■
Zielsysteme für Curriculum und Unterricht	■	■	■	■	■
motivationale Orientierungen und selbstregulative Fähigkeiten					
Kontrollüberzeugungen und Selbstwirksamkeitserwartungen	■	■		■	
intrinsische motivationale Orientierungen: Lehrerenthusiasmus					
Selbstregulation: Engagement und Distanzierungsfähigkeit				■	

Tabelle A.5: Zuordnung von Kompetenzaspekten (nach dem Modell professioneller Handlungskompetenz) für Textvignette 3 (Zutreffendes grau)

Professionswissen	**Zuordnungsvorlage**	**Experte 1**	**Experte 2**	**Experte 3**	**Experte 4**
pädagogisches Wissen					
Fachwissen					
fachdidaktisches Wissen					
Überzeugungen (beliefs) / Werthaltungen					
Wertbindungen					
epistemologische Überzeugungen					
subjektive Theorien					
Zielsysteme für Curriculum und Unterricht					
motivationale Orientierungen und selbstregulative Fähigkeiten					
Kontrollüberzeugungen und Selbstwirksamkeitserwartungen					
intrinsische motivationale Orientierungen: Lehrerenthusiasmus					
Selbstregulation: Engagement und Distanzierungsfähigkeit					

Tabelle A.6: Zuordnung zwischen Kompetenzaspekten (nach dem Modell professioneller Handlungskompetenz) und den Textvignetten (Zutreffendes grau)

Professionswissen	**Vignette 1**	**Vignette 2A**	**Vignette 2B**	**Vignette 3**
pädagogisches Wissen		■	■	
Fachwissen	■	■	■	■
fachdidaktisches Wissen	■	■	■	■
Überzeugungen (beliefs) / Werthaltungen				
Wertbindungen	■			■
epistemologische Überzeugungen	■	■	■	■
subjektive Theorien				
Zielsysteme für Curriculum und Unterricht	■	■	■	■
motivationale Orientierungen und selbstregulative Fähigkeiten				
Kontrollüberzeugungen und Selbstwirksamkeitserwartungen		■		■
intrinsische motivationale Orientierungen: Lehrerenthusiasmus				
Selbstregulation: Engagement und Distanzierungsfähigkeit	■			■

B Codierleitfäden

B.1 Codierleitfaden *G*: Gedanken bei der Konfrontation mit einer wissenschaftlichen Kontroverse

	G1. Informationen des gelesenen Materials darstellen
Name der Kategorie:	**G1.1 konkrete Informationen wiedergeben**
inhaltliche Beschreibung:	Es werden einzelne Informationen aus den gelesenen Materialien genannt/zitiert.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn Informationen aus den gelesenen Materialien unverändert und nicht zusammengefasst im Wortlaut oder Sinn der ursprünglichen Autoren wiedergegeben werden.
Beispiele für Anwendungen:	*„Formel $F = \gamma^3 ma$"* (L9F2) *„Einstein selbst ist jedoch eigentlich gegen die relative Masse."* (S1B1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn mehrere Informationen mit eigenen Worten als Zusammenfassung wiedergegeben werden oder zusätzliche eigene Gedanken als Fazit formuliert werden. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G1.2 codiert. Zum Beispiel: *„Für Teilchen nahe c II zu F folgt F=γ^3ma ↯ nicht wie in Klassik formbar → Es wird in der Teilchenphysik nur die Ruhemasse verwendet!"* (S1B1)

	G1. Informationen des gelesenen Materials darstellen
Name der Kategorie:	**G1.2 neutrale eigene Zusammenfassung/Fazit**
inhaltliche Beschreibung:	Es werden wertneutral mehrere bzw. wesentliche Informationen mit eigenen Worten zusammengefasst oder ein Fazit (eigene Gedanken) zu den gelesenen Inhalten formuliert.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn Inhalte des gelesenen Materials als Zusammenfassung wertneutral wiedergegeben werden oder zu diesen Inhalten ein wertneutrales zusammenfassendes Fazit aus der Perspektive des Befragten gezogen wird.
Beispiele für Anwendungen:	*„Die Ausführungen im U-Material 2 erläutern nicht die Begriffe Ruhemasse und dynam. Masse, sondern die Zweckmäßigkeit der Verwendung dieser Begriffe in der Teilchenphysik."* (L19F3) *„Nach der hier dargebotenen Argumentation gibt es auch Vorteile der pro-relativistischen Masse-Auffassung."* (S22B2)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn Aussagen oder Argumente hinsichtlich ihrer Gültigkeit, Belege und Strukturen kritisch bewertet werden. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G5.2 codiert. Zum Beispiel: *„Jetzt wird der Begriff „Widerstand" eingeführt, aber die Eigenschaften dieses Begriffs bleiben unklar."* (L43F6) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn erkannt wird, dass der Gebrauch einer geschwindigkeitsabhängigen Masse (relativistische Masse) kontrovers diskutiert werden kann. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G6.1 codiert. Zum Beispiel: *„Fazit aus den letzten Texten: große Meinungsverschiedenheit über relativistische Masse"* (S10B1) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn eine eigene Position hinsichtlich der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse erkennbar ist. ⇨ In diesem Fall werden Kategorie G6.4 oder G6.5 codiert. Zum Beispiel G6.4: *„Masse ist also abhängig vom Bezugssystem."* (L43F6)

Name der Kategorie:	**G2. die Darstellung (Textmerkmale) des Inhaltes bewerten**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird die Darstellung des Inhaltes bzw. des gelesenen Materials als solches hinsichtlich oberflächlicherer/formalerer Aspekte (Textmerkmale) beurteilt.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn die Darstellung von Inhalten als eher positiv (Kategorie G2.1) oder negativ (Kategorie G2.2) hinsichtlich oberflächlicher bzw. globaler Textmerkmale, wie Textverständlichkeit, Anschaulichkeit oder inhaltliche Klarheit/Genauigkeit, also bspw. auch im Hinblick auf „Unterrichts-/Schülergeeignetheit" eingeschätzt wird.
Beispiele für Anwendungen:	*„Material 1: anschaulich durch Graphik"* (L14F3) *„Lehrbuchausschnitt Duden: reines Nennen von Fakten, kaum Erklärung, die Informationen werden reingeschmissen"* (S12B2)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Befragten mit Fokus auf dem eigenen Verständnis Verwirrung ausdrücken. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G4.4 codiert. Zum Beispiel: *„Unterrichtsmaterial 2 (Unterrichtsmaterialheft) ist verwirrend formuliert"* (L33F5) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn konkrete Aussagen oder Argumente des gelesenen Materials kritisch bewertet werden. ⇨ In diesem Fall werden Kategorie G5.1 oder G5.2 codiert. Zum Beispiel G5.2: *„Jetzt wird der Begriff „Widerstand" eingeführt, aber die Eigenschaften dieses Begriffs bleiben unklar."* (L43F6)

Name der Kategorie:	**G3. eigene Erfahrungen beschreiben**
inhaltliche Beschreibung:	Es werden Erfahrungen, die zu einem Thema gesammelt worden sind, beschrieben (Retrospektive). Beispielsweise reflektieren Lehrkräfte ihren bisherigen Unterricht oder Studierende nennen eigene Lernerfahrungen.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn bereits zurückliegende Erfahrungen im eigenen gehaltenen Unterricht oder selbstgemachte Erfahrungen in Bezug auf ein bestimmtes Thema beschrieben werden.
Beispiele für Anwendungen:	*„Anti-Ansicht bei mir eigentlich gar kein Thema (im UR)"* (L23F4) *„wir haben in der Vorlesung KeT durchaus mit dynamischen Massen gerechnet…"* (S10B1)

Name der Kategorie:	**G4. eigenes Verständnis/Wissen reflektieren oder einschätzen** **G4.1 eigenes Verständnis eines Inhaltes wiedergeben**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird das eigene Verständnis eines bestimmten Inhaltes dargestellt.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn das eigene Verständnis konkreter Inhalte verbalisiert wird.
Beispiele für Anwendungen:	*„mein Verständnis: Ruhemasse = Masse eines ruhenden Teilchens in einem Inertialsystem → Masse ist unveränderlich“* (S11B1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn nicht das eigene Verständnis eines bestimmten Inhaltes dargestellt wird, sondern lediglich Informationen zu den gelesenen Inhalten mit eigenen Worten zusammengefasst werden oder ein Fazit (eigene Gedanken) formuliert wird. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G1.2 codiert. Zum Beispiel: *„Für Teilchen nahe c II zu F folgt F=γ^3ma ↯ nicht wie in Klassik formbar“* (S1B1)

Name der Kategorie:	**G4. eigenes Verständnis/Wissen reflektieren oder einschätzen** **G4.2 Verständnisprobleme/Wissenslücken äußern**
inhaltliche Beschreibung:	Es werden Probleme beim Verständnis von Inhalten formuliert oder Lücken im eigenen Wissen aufgezeigt.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn die Befragten … (1) Probleme beim Verstehen von Inhalten äußern, oder (2) Wissenslücken benennen, oder (3) eigene Fehlvorstellungen reflektieren, oder (4) betonen, dass Inhalte für sie neu sind, oder (5) aufgrund von Verständnisproblemen oder Wissenslücken konkrete Fachfragen zu physikalischen Inhalten stellen.
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„Aussage verstehe ich noch nicht so ganz“* (S10B1) (2) *„jedoch selbst keine zufriedenstellende Erklärung habe.“* (S21B2) (3) *„sehr schnelle Ausprägung von Fehlvorstellungen → hab ich wahrscheinlich auch“* (S11B1) (4) *„die Gleichung $F = \gamma^3 ma$ habe ich so noch nie gesehen“* (L30F5) (5) *„Wenn sich bei ΔE in mc^2=E nicht die Masse ändert, so ist c≠c also müsste sich die Lichtgeschwindigkeit ändern?!“* (S21B2)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Befragten … ▪ eigene Verwirrung ausdrücken, oder ▪ sich (eigene/s Verständnis/Vorstellungen) herausgefordert sehen, über bestimmte Inhalte weiter nachdenken zu müssen, oder ▪ ausdrücken, dass gelesene Inhalte nicht mit dem eigenen Verständnis/Vorwissen vereinbar sind oder im Widerspruch zu eigenen Vorstellungen stehen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G4.4 codiert. Zum Beispiel: *„Jetzt bin ich ganz verwirrt und weiß gar nicht mehr, was eigentlich stimmt.“* (L5F1) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn Aussagen bzw. Argumente des gelesenen Materials angezweifelt/in Frage gestellt werden. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G5.2 codiert. Zum Beispiel: *„Ist das nicht experimentell gesichert?“* (L26F4)

	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn eine Fachfrage als weiterführende Fragestellung formuliert wird, die darauf abzielt, zusätzliche Informationen oder ergänzende Erklärungen zu erhalten. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G5.3 codiert. Zum Beispiel: *„Wieso hat die Relativität der Zeitmessung was damit zu tun?"* (S7B1) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass durch die Inhalte des gelesenen Materials Zweifel oder Verunsicherung hinsichtlich der eigenen Position zu den Ansätzen Anti- bzw. Pro-relativistische Masse besteht. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G6.2 codiert. Zum Beispiel: *„Man kommt schon ins Zweifeln, was nun „richtig" ist und was unterrichtet werden soll."* (L26F4)

Name der Kategorie:	**G4. eigenes Verständnis/Wissen reflektieren oder einschätzen** **G4.3 Konformität mit bestehendem Verständnis/Wissen**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass bestimmte Inhalte des gelesenen Materials zum eigenen Verständnis, Vorwissen oder zu den eigenen Vorstellungen passen bzw. damit vereinbar sind.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn die Befragten mit Fokus auf dem eigenen Verständnis und ohne erkennbare Positionierung zu den Ansätzen Anti- bzw. Pro-relativistische Masse … (1) betonen, dass Inhalte bereits bekannt sind (bestehendes Wissen), oder (2) angeben, dass Inhalte des gelesenen Materials dem eigenen Verständnis, Vorwissen, den eigenen Vorstellungen entsprechen, oder (3) Inhalte des gelesenen Materials in das vorhandene Verständnis bzw. Wissensgebäude gelingend integrieren können (verstehen können).
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„die Sache mit dem Photon kenn ich & versteh ich"* (L21F4) (2) *„Es entspricht meiner Anschauung."* (L29F5) (3) *„E_0=mc^2 und E=mc^2 sind verschieden! KLAR!"* (S7B1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn konkrete Aussagen oder Argumente des gelesenen Materials bewertet werden, so dass der Fokus nicht auf dem eigenen Verständnis, sondern bspw. auf der Akzeptanz oder Bewertung eines Argumentes liegt. ⇨ In diesem Fall werden Kategorie G5.1 oder G5.2 codiert. Zum Beispiel G5.1: *„bei d. Diskussion zu möglichen Fehlvorstellungen gehe ich mit"* (L15F3) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn eine eigene Position hinsichtlich der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse erkennbar ist. ⇨ In diesem Fall werden Kategorie G6.4 oder G6.5 codiert. Zum Beispiel G6.4: *„U2.: Bestätigung: Masse ist abhängig vom Bezugssystem!"* (L43F6)

Name der Kategorie:	**G4. eigenes Verständnis/Wissen reflektieren oder einschätzen** **G4.4 Konflikt zu bestehendem Verständnis/Wissen, Irritation**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass bestimmte Inhalte des gelesenen Materials in Konflikt mit dem eigenen Verständnis, Vorwissen oder den eigenen Vorstellungen stehen bzw. diese irritieren oder herausfordern.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn die Befragten mit Fokus auf dem eigenen Verständnis und ohne erkennbare Positionierung zu den Ansätzen Anti- bzw. Pro-relativistische Masse … (1) eigene Verwirrung ausdrücken, oder (2) sich (eigenes Verständnis/Vorstellungen) herausgefordert sehen, über bestimmte Inhalte weiter nachdenken zu müssen, oder (3) ausdrücken, dass Inhalte des gelesenen Materials nicht mit dem eigenen Verständnis/Vorwissen vereinbar sind bzw. im Widerspruch zu eigenen Vorstellungen stehen.
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„jetzt bin ich verwirrt“* (L21F4) (2) *„denke (muss) über die anti Haltung nachdenken“* (L15F3) (3) *„entspricht nicht meinen Gedankengängen“* (L23F4)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Befragten … ▪ Probleme beim Verstehen von Inhalten äußern, oder ▪ Wissenslücken benennen, oder ▪ eigene Fehlvorstellungen reflektieren, oder ▪ betonen, dass Inhalte für sie neu sind, oder ▪ konkrete Fachfragen zu physikalischen Inhalten stellen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G4.2 codiert. Zum Beispiel: *„diese Ideen zur Invarianz der Masse begegnen mir heute zum ersten Mal“* (L22F4) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn konkrete Aussagen oder Argumente des gelesenen Materials kritisch bewertet werden, so dass der Fokus nicht auf dem eigenen Verständnis, sondern bspw. auf der Akzeptanz oder Bewertung eines Argumentes liegt. ⇨ In diesem Fall werden Kategorie G5.1 oder G5.2 codiert. Zum Beispiel G5.2: *„Ist das nicht experimentell gesichert?“* (L26F4) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass durch die Inhalte des gelesenen Materials Zweifel oder Verunsicherung hinsichtlich der eigenen Position zu den Ansätzen Anti- bzw. Pro-relativistische Masse besteht. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G6.2 codiert. Zum Beispiel: *„Man kommt schon ins Zweifeln, was nun „richtig“ ist und was unterrichtet werden soll.“* (L26F4) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn eine eigene Position hinsichtlich der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse erkennbar ist. ⇨ In diesem Fall werden Kategorie G6.4 oder G6.5 codiert. Zum Beispiel G6.5: *„Ich widerspreche Teil 2 - Unterscheidung wichtig z.B. für Beschleunigung gel. Teilchen im E-Feld (v_0=0)“* (L18F3)

<table>
<tr><th rowspan="2">Name der Kategorie:</th><th>G5. mit Aussagen/Argumenten auseinandersetzen</th></tr>
<tr><th>G5.1 zustimmend/akzeptierend bewerten</th></tr>
<tr><td>inhaltliche Beschreibung:</td><td>Es wird eine Aussage oder ein Argument des gelesenen Materials so bewertet, dass Zustimmung bzw. Akzeptanz des Befragten erkennbar ist.</td></tr>
<tr><td>Anwendung der Kategorie:</td><td>Diese Kategorie wird codiert, wenn Aussagen oder Argumente hinsichtlich eines der folgenden Aspekte positiv bewertet werden, so dass der/die Befragte diesbezüglich Zustimmung bzw. Akzeptanz ausdrückt, ohne erkennbare Positionierung zu den Ansätzen Anti- bzw. Pro-relativistische Masse:
(1) Maß an Zustimmung
(2) Relevanz
(3) Stärke (Überzeugungskraft)
(4) Nachvollziehbarkeit oder Logik</td></tr>
<tr><td>Beispiele für Anwendungen:</td><td>(1) „bei d. Diskussion zu möglichen Fehlvorstellungen gehe ich mit“ (L15F3)
(2) „Der letzte Satz auf der Vorderseite ist der Schlüssel“ (L14F3)
(3) „Text 2 (Photonen) überzeugt eher (aber man ist ja „geprägt“ …)“ (L26F4)
(4) „Die mathematischen Argumente sind nachvollziehbar und logisch.“ (S1B1)</td></tr>
<tr><td>Abgrenzung zu anderen Kategorien:</td><td>Die Kategorie wird nicht codiert, wenn Inhalte des gelesenen Materials lediglich als Zusammenfassung wertneutral wiedergegeben werden oder zu diesen Inhalten ein zusammenfassendes Fazit aus der Perspektive des Befragten gezogen wird.
⇨ In diesem Fall wird Kategorie G1.2 codiert. Zum Beispiel:
„liefert interessante, zusätzliche Informationen.“ (L37F5)

Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Darstellung von Inhalten lediglich hinsichtlich oberflächlicher bzw. globaler Textmerkmale, wie Textverständlichkeit, Anschaulichkeit oder inhaltliche Klarheit/Genauigkeit eingeschätzt wird.
⇨ In diesem Fall wird Kategorie G2 codiert. Zum Beispiel:
„Material erscheint durch Anschaulichkeit besser verständlich“ (S11B1)

Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Befragten mit Fokus auf dem eigenen Verständnis …
▪ angeben, dass Inhalte des gelesenen Materials dem eigenen Verständnis, Vorwissen, den eigenen Vorstellungen entsprechen, oder
▪ Inhalte des gelesenen Materials in das vorhandene Verständnis bzw. Wissensgebäude gelingend integrieren können (verstehen können).
⇨ In diesem Fall wird Kategorie G4.3 codiert. Zum Beispiel:
„Es entspricht meiner Anschauung.“ (L29F5)

Die Kategorie wird nicht codiert, wenn eine eigene Position hinsichtlich der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse erkennbar ist.
⇨ In diesem Fall werden Kategorie G6.4 oder G6.5 codiert.
Zum Beispiel G6.5:
„nach der Argumentation bin ich voll für rel. Masse“ (L21F4)</td></tr>
</table>

Name der Kategorie:	**G5. mit Aussagen/Argumenten auseinandersetzen** **G5.2 kritisierend bewerten**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird Kritik an Aussagen oder Argumenten hinsichtlich ihrer Gültigkeit, Belege oder Strukturen in Form einer Bewertung oder kritischen Analyse geübt.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn in Bezug auf bestimmte Aussagen oder Argumente des gelesenen Materials … (1) begründet widersprochen (z.B. Gegenargumente) wird, oder (2) die Begründungen/Belege kritisiert werden, oder (3) die Schlüssigkeit angezweifelt/Schlussfolgerungen kritisiert werden, oder (4) die Genauigkeit von Aussagen bemängelt wird, oder (5) Zweifel geübt wird (in Frage stellen).
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„meiner Meinung nach, verursacht es keine Widersprüche, man muss in ein anderes Bezugssystem gehen, um das plausibel erklären zu können“* (S7B1) (2) *„Klingt für mich nach wenig belegten Aussagen“* (S10B1) (3) *„Gesamtenergie der Gasmenge und Masse der einzelnen Atome werden meiner Meinung nach kurzschlüssig aufeinander bezogen“* (L14F3) (4) *„Jetzt wird der Begriff „Widerstand“ eingeführt, aber die Eigenschaften dieses Begriffs bleiben unklar.“* (L43F6) (5) *„Ist das nicht experimentell gesichert?“* (L26F4)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn Inhalte des gelesenen Materials lediglich als Zusammenfassung wertneutral wiedergegeben werden oder zu diesen Inhalten ein zusammenfassendes Fazit aus der Perspektive des Befragten gezogen wird. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G1.2 codiert. Zum Beispiel: *„Die Ausführungen im U-Material 2 erläutern nicht die Begriffe Ruhemasse und dynam. Masse, sondern die Zweckmäßigkeit der Verwendung dieser Begriffe in der Teilchenphysik.“* (L19F3) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn lediglich die Darstellung von Inhalten hinsichtlich oberflächlicher bzw. globaler Textmerkmale, wie Textverständlichkeit, Anschaulichkeit oder inhaltliche Klarheit/Genauigkeit eingeschätzt wird, ohne einen Zusammenhang zu bestimmten Aussagen bzw. Argumenten des gelesenen Materials herzustellen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G2 codiert. Zum Beispiel: *„Lehrbuchausschnitt Duden: reines Nennen von Fakten, kaum Erklärung, die Informationen werden reingeschmissen“* (L37F5) Diese Kategorie wird nicht codiert, wenn der Fokus darauf liegt, dass die Befragten ihr eigenes Verständnis/Wissen in Beziehung zu den gelesenen Materialien setzen. ⇨ In diesem Fall werden die Kategorien G4.2, G4.3 oder G4.4 codiert. Zum Beispiel G4.2: *„Ein Photon wird von Objekten mit Masse angezogen? Ist mir neu!“* (S10B1)

	Diese Kategorie wird nicht codiert, wenn statt eine Aussage bzw. Argumentation in Frage zu stellen (Anzweifeln) eine weiterführende Fragestellung formuliert wird, die darauf abzielt, zusätzliche Informationen oder ergänzende Erklärungen zu erhalten. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G5.3 codiert. Zum Beispiel: *„Aber welche Fehlvorstellungen werden bedient!?“* (S22B2) Diese Kategorie wird nicht codiert, wenn die kritische Bewertung von Aussagen bzw. Argumenten einen eigenen originären Gedanken im Sinne von Kategorie G5.4 enthält, der über das gelesene Material hinausgeht. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G5.4 codiert. Zum Beispiel: *„wenn Ruhemasse nicht eingeführt wird, dann ist das ein Widerspruch zur Formel* $E=mc^2$*“* (L9F2) Diese Kategorie wird nicht codiert, wenn eine eigene Position hinsichtlich der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse erkennbar ist. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G6.5 codiert. Zum Beispiel: *„Anti: erscheint inkonsistent, weil sich Ruhemasse mehrerer Teilchen ändert (Ich finde es recht schwer nachvollziehbar)“* (S7B1)

	G5. mit Aussagen/Argumenten auseinandersetzen
Name der Kategorie:	**G5.3 weiterführende Fragestellung**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird eine weiterführende Fragestellung formuliert, die darauf abzielt, zusätzliche Informationen oder ergänzende Erklärungen zu erhalten.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn eine Fragestellung formuliert wird, die Interesse (des Befragten) erkennen lässt, weiterführende, nicht aus dem gelesenen Material zu gewinnende, Informationen oder Erklärungen zu erhalten, um Aussagen, Zusammenhänge oder Standpunkte besser nachvollziehen oder einordnen zu können. (Dabei handelt es sich nicht um eine rhetorische Frage.)
Beispiele für Anwendungen:	*„Aber welche Fehlvorstellungen werden bedient!?“* (S22B2) *„Möchte Okun die Relativitätstheorie widerlegen?“* (L33F5)
weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn eine weiterführende Fachfrage zur Herkunft oder Herleitung einer Gleichung formuliert wird, ohne dass ein Verständnisproblem (oder eine Wissenslücke) zu Grunde liegt. Zum Beispiel: *„Wo kommt denn Gl. (5) her?“* (L26F4)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn eine konkrete inhaltliche Fachfrage gestellt wird, die ein Verständnisproblem oder eine Wissenslücke abbildet, welche weitestgehend unabhängig von der Argumentation/vom Standpunkt im Text geklärt werden soll. Das heißt, wenn eine Frage gestellt wird, die bspw. mithilfe eines entsprechenden Fachlehrbuches/ Nachschlagewerkes unkompliziert beantwortet werden kann und prinzipiell unabhängig von der Diskussion zur relativistischen Masse ist. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G4.2 codiert. Zum Beispiel: *„Was bedeutet „geodätisch“?“* (S10B1) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn Aussagen bzw. Argumente des gelesenen Materials angezweifelt/in Frage gestellt werden. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G5.2 codiert. Zum Beispiel: *„Ist das nicht experimentell gesichert?“* (L26F4)

	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn in Frage gestellt wird/daran gezweifelt wird, welcher der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse richtig sei oder eine Frage formuliert wird, ob Masse relativ oder invariant ist. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G6.2 codiert. Zum Beispiel: *„ist Abhängigkeit der Masse von Geschwindigkeit eine sinnvolle Theorie oder nicht?“* (S10B1) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn eine Fachfrage- oder Problemstellung in Zusammenhang mit einem Unterrichtskontext formuliert wird. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G7.5 codiert. Zum Beispiel: *„weiterführende Fragestellung: Wie in eigenen Unterricht darstellen/vermitteln?“* (S11B1)

	G5. mit Aussagen/Argumenten auseinandersetzen
Name der Kategorie:	**G5.4 eigene Argumente/Belege**
inhaltliche Beschreibung:	Es werden eigene, nicht in den gelesenen Materialien enthaltene Argumente oder be-/widerlegende Aussagen formuliert, die über die gelesenen Materialien hinausgehen.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn … (1) Argumente oder (2) Aussagen, als Belege für oder gegen eine bestimmte Position, formuliert werden, die als solche nicht den gelesenen Materialien entnommen werden können, so dass eine eigenständige Denk- bzw. Gedächtnisleistung des Befragten als originärem Urheber des Arguments oder der Aussage vorliegt.
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„Meiner Meinung nach ist ein Verweis auf die relativistische Masse(zunahme) notwendig, um zu erklären, dass ein Elektron auch bei hohen Beschleunigungsspannungen nie schneller als c werden kann“* (L37F5) (2) *„Experimente mit Licht zeigen aber, dass sie sich verhalten, als hätten sie eine Masse (Lichtblitz auf Spiegel → Auslenkung)“* (L18F3)
weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn in Bezug auf Material 2/Lehrplan Türkei eine Aussage zum Einfluss ideologischer bzw. politischer Autorität/Interessen formuliert wird. Zum Beispiel: *„Deckt sich mit meinen Erfahrungen, dass die Erdogan-Regierung bestrebt ist zu vermeiden, die Schüler zum selbstständigen Denken zu erziehen.“* (L37F5) Diese Kategorie wird auch codiert, wenn die Analyse oder Bewertung von Aussagen bzw. Argumenten einen eigenen originären Gedanken enthält, der über das gelesene Material hinausgeht. Zum Beispiel: *„wenn Ruhemasse nicht eingeführt wird, dann ist das ein Widerspruch zur Formel $E=mc^2$“* (L9F2)

	Die Kategorie wird auch codiert, wenn bei einer Positionierung mit Begründung (Kategorie G6.5) die Begründung einen eigenen originären Gedanken im Sinne von Kategorie G5.4 enthält, der über das gelesene Material hinausgeht. Dabei wird nur die eigenständige Begründung zusätzlich mit der Kategorie G5.4 codiert, nicht aber die eigene Position. Zum Beispiel: *„Unterscheidung wichtig z.B. für Beschleunigung gel. Teilchen im E-Feld (v_0=0)“* (L18F3)

	G6. zu Ansatz Pro/Anti *m*(*v*) positionieren
Name der Kategorie:	**G6.1 Kontroverse/Diskussion erkennen**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird erkannt, dass der Gebrauch einer geschwindigkeitsabhängigen Masse (relativistische Masse) kontrovers diskutiert werden kann.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn zum Ausdruck gebracht wird, dass … (1) gegensätzliche, miteinander in Konflikt stehende Positionen zum Gebrauch des Begriffs der relativistischen Masse zu existieren scheinen**,** oder (2) sich widersprechende Positionen durch das gelesene Material dargestellt werden, oder (3) in Bezug auf die Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse die Kriterien „richtig“/„falsch“ nicht einfach anzuwenden sind, oder (4) im Sinne der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse verschiedene Interpretationen der Experimente zur Massenbestimmung (Material 7) existieren, oder (5) eine Diskussion im Hinblick auf die Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse besteht/möglich ist, oder (6) eine Problematik hinsichtlich der Begriffe „Ruhemasse“/„Masse“/„relativistische Masse“ vorliegt, oder (7) eine Kontroverse zur Einführung des Begriffs der relativistischen Masse unter verschiedenen Fachautoren besteht (keine Einigkeit).
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„Fazit aus den letzten Texten: große Meinungsverschiedenheit über relativistische Masse“* (S10B1) (2) *„Beide Texte stehen ja im Grunde im Widerspruch zueinander“* (S9B1) (3) *„Gedanke: Das scheint ein tolles Thema für Dinge ohne richtig & falsch zu sein.“* (L21F4) (4) *„Es sind offensichtlich viele Deutungen bzgl. der Experimente möglich, aber auch nötig, um keinen wissenschaftlichen Ansatz zu vergessen“* (L29F5) (5) *„kann man diskutieren“* (L15F3) (6) *„Problematik Ruhemasse und bewegte Masse“* (L10F2) (7) *„Wenn es in der Physik in Bezug auf die relative Masse Uneinigkeit gibt“* (S1B1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass beide Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse oder entsprechende Teilaspekte im Unterricht diskutiert werden sollten/können. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G7.3 codiert. Zum Beispiel: *„Aufgrund dieser beiden Ansichten empfinde ich es als sinnvoll & notwendig beide Standpunkte mit den Schüler*innen zu diskutieren“* (S21B2)

	G6. zu Ansatz Pro/Anti *m*(*v*) positionieren
Name der Kategorie:	**G6.2 Verunsicherung der eigenen Position**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass durch die Inhalte des gelesenen Materials Zweifel oder Verunsicherung hinsichtlich der eigenen Position zu den Ansätzen Anti- bzw. Pro-relativistische Masse besteht.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass … (1) hinsichtlich der bisherigen eigenen Position zu den Ansätzen Anti- bzw. Pro-relativistische Masse Verunsicherung besteht, oder (2) in Frage gestellt wird/daran gezweifelt wird, welcher der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse richtig sei, oder (3) eine Frage formuliert wird, ob Masse relativ oder invariant ist.
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„Nun stelle ich alles in Frage und bin maximal verunsichert"* (S12B2) (2) *„Darf man $\gamma \cdot m_0$ als eine Masse interpretieren oder muss man überall wo nötig „m" durch „$\gamma \cdot m_0$" ersetzen?"* (26F4) (3) *„Ist Masse invariant?"* (L43F6)
Abgrenzung zu anderen Kategorie:	Diese Kategorie wird nicht codiert, wenn der Fokus darauf liegt, dass die Befragten ihr eigenes Verständnis/Wissen in Beziehung zu den gelesenen Materialien setzen, ohne dass explizit ein Bezug zur eigenen Position hinsichtlich der Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse besteht. ⇨ In diesem Fall werden die Kategorien G4.2 oder G4.4 codiert. Zum Beispiel G4.2: *„Können Photonen denn überhaupt eine Masse besitzen?"* (S13B2) Diese Kategorie wird nicht codiert, wenn eine weiterführende Fragestellung formuliert wird, die darauf abzielt, zusätzliche Informationen oder ergänzende Erklärungen zu erhalten. ⇨ In diesem Fall wird Kategorien G5.3 codiert. Zum Beispiel: *„Wenn die Verwendung der relativistischen Masse schultechnisch umstritten ist wieso stehts dann im Lehrplan?"* (S1B1) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn angegeben wird, dass keine eigene Positionierung hinsichtlich der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse möglich ist. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G6.3 codiert. Zum Beispiel: *„Hin- und Hergerissen zwischen beiden Seiten (Pro- und Anti-Ansicht)"* (S10B1) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn eine Frage- oder Problemstellung in Zusammenhang mit einem Unterrichtskontext formuliert wird. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G7.5 codiert. Zum Beispiel: *„weiterführende Fragestellung: Wie in eigenen Unterricht darstellen/vermitteln?"* (S11B1)

	G6. zu Ansatz Pro/Anti *m*(*v*) positionieren
Name der Kategorie:	**G6.3 nicht positionieren können (Unentscheidbarkeit)**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird angegeben, dass keine eigene Positionierung hinsichtlich der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse möglich ist.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn zum Ausdruck gebracht wird, dass der/die Befragte … (1) selbst unentschieden ist, wie man sich hinsichtlich der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse positionieren soll, oder (2) nicht in der Lage ist, eine eigene Position hinsichtlich der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse zu finden, oder (3) nicht in der Lage ist, die beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse zu bewerten.
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„Hin- und Hergerissen zwischen beiden Seiten (Pro- und Anti-Ansicht)“* (S10B1) (2) *„Keine Entscheidung möglich (für mich) ob pro- oder contra Ansicht mehr Sinn macht“* (S13B2) (3) *„ich fühle mich nicht in der Lage zu urteilen“* (S12B2)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn der Fokus darauf liegt, dass bestimmte Inhalte des gelesenen Materials in Konflikt mit dem eigenen Verständnis/Wissen stehen bzw. dieses irritieren, aber nicht zwangsläufig Unentscheidbarkeit bezüglich der beiden Ansätze vorliegt. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G4.4 codiert. Zum Beispiel: *„Jetzt bin ich ganz verwirrt und weiß gar nicht mehr, was eigentlich stimmt.“* (L5F1) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn zwar Zweifel oder Verunsicherung hinsichtlich der eigenen Position zu den Ansätzen Anti- bzw. Pro-relativistische Masse besteht, aber noch keine Unentscheidbarkeit bezüglich der beiden Ansätze vorliegt. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G6.2 codiert. Zum Beispiel: *„Ist Masse invariant?“* (L43F6) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn eine Frage- oder Problemstellung in Zusammenhang mit einem Unterrichtskontext formuliert wird. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G7.5 codiert. Zum Beispiel: *„weiterführende Fragestellung: Wie in eigenen Unterricht darstellen/vermitteln?“* (S11B1)

	G6. zu Ansatz Pro/Anti $m(v)$ positionieren
Name der Kategorie:	**G6.4 positionieren ohne Begründung**
inhaltliche Beschreibung:	Es ist eine eigene Position hinsichtlich der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse erkennbar, jedoch ohne diese Positionierung zu begründen.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn sich ohne Unterrichtsbezug entweder explizit auf einen der Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse oder allgemein auf den Inhalt des gelesenen Materials (wenn dieses einen bestimmten Ansatz darstellt) bezogen wird und … (1) Zustimmung oder Ablehnung zu einem der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse formuliert wird*, oder (2) eine Wertung eines Ansatzes Anti- bzw. Pro-relativistische Masse vorgenommen wird, ohne diese zu begründen, oder (3) eine eigene fachliche Darstellung von Inhalten formuliert wird, die sich einem der Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse zuordnen lässt. (*Anhand der Formulierung muss die eigene Positionierung hinsichtlich der Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse erkennbar sein.) ⇨ Wenn eine Positionierung für genau einen der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse ersichtlich ist, wird die jeweilige Unterkategorie codiert: G6.4.1 Pro m(v) G6.4.2 Anti m(v) ⇨ Wenn keine Positionierung für genau einen der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse ersichtlich ist, wird statt einer der beiden Unterkategorien G6.4.1 oder G6.4.2 lediglich die Kategorie G6.4 codiert.
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„stimme ich zu."* (L19F3) (2) *„Für mich gehört die Relativität der Masse auch zum Kern der speziellen Relativitätstheorie."* (S22B2) (3) *„Masse ist also abhängig vom Bezugssystem."* (L43F6)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn konkrete Argumente bewertet werden (Es wird nicht einer der Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse als Ganzes betrachtet.) ⇨ In diesem Fall werden Kategorie G5.1 oder G5.2 codiert. Zum Beispiel G5.1: „Theorie zu Photonen klingt plausibel → Gutes Argument für pro-rel. Masse" (S13B2) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ein Bezug zum Unterricht bspw. im Sinne einer Konsequenz für die Umsetzung im Unterricht hergestellt wird. ⇨ In diesem Fall werden Kategorie G7.1 oder G7.2 codiert. Zum Beispiel G7.1: *„Pro-Ansicht macht für die Einführung im Unterricht Sinn"* (L9F2)

<table>
<tr><th></th><th>G6. zu Ansatz Pro/Anti m(v) positionieren</th></tr>
<tr><td>Name der Kategorie:</td><td>G6.5 positionieren mit Begründung/Bewertungskriterium</td></tr>
<tr><td>inhaltliche Beschreibung:</td><td>Es ist eine eigene begründete Position hinsichtlich der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse erkennbar.</td></tr>
<tr><td>Anwendung der Kategorie:</td><td>Diese Kategorie wird codiert, wenn sich ohne Unterrichtsbezug entweder explizit auf einen der Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse oder allgemein auf den Inhalt des gelesenen Materials (wenn dieses einen bestimmten Ansatz darstellt) bezogen wird und …
(1) eine begründete Zustimmung oder Ablehnung zu einem der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse formuliert wird*, oder
(2) eine begründete (Bewertungskriterium, Belege) Bewertung eines Ansatzes Anti- bzw. Pro-relativistische Masse vorgenommen wird, oder
(3) begründet eine eigene fachliche Darstellung von Inhalten formuliert wird, die sich einem der Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse zuordnen lässt.

(*Anhand der Formulierung muss die eigene Positionierung hinsichtlich der Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse erkennbar sein.)

⇨ Wenn eine Positionierung für genau einen der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse ersichtlich ist, wird die jeweilige Unterkategorie codiert:
G6.5.1 Pro m(v)
G6.5.2 Anti m(v)

⇨ Wenn keine Positionierung für genau einen der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse ersichtlich ist, wird statt einer der beiden Unterkategorien G6.5.1 oder G6.5.2 lediglich die Kategorie G6.5 codiert.</td></tr>
<tr><td>Beispiele für Anwendungen:</td><td>(1) „Masse unabhängig von Bezugssys. Beweis Rechnungen (5) (6) (7)“ (S1B1)
(2) „Arbeit mit rel. Masse einfacher, logischer“ (L2F1)
(3) „geladene Teilchen können als Nachweis der Zunahme der Masse bei Erhöhung der Geschwindigkeit verwendet werden“ (S17B2)</td></tr>
<tr><td>weitere Anwendungen:</td><td>Die Kategorie wird auch codiert, wenn als Begründung ein Argument oder allgemein die Argumentation des gelesenen Materials angeführt wird.
Zum Beispiel:
„nach der Argumentation bin ich voll für rel. Masse“ (L21F4)

Die Kategorie wird auch codiert, wenn die Begründung einen eigenen originären Gedanken im Sinne von Kategorie G5.4 enthält, der über das gelesene Material hinausgeht. Diese eigenständige Begründung wird dann zusätzlich mit der Kategorie G5.4 codiert.
Zum Beispiel:
„Ich widerspreche Teil 2 - Unterscheidung wichtig z.B. für Beschleunigung gel. Teilchen im E-Feld (v_0=0)“ (L18F3)</td></tr>
</table>

Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn konkrete Argumente kritisch bewertet werden. (Es wird nicht einer der Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse als Ganzes betrachtet.) ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G5.2 codiert. Zum Beispiel: *„Davor stand doch, dass Widerstand von Geschw. des Teilchens abhängt, diese entsteht doch auch nicht im Teilchen selbst.“* (S10B1) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ein Bezug zum Unterricht bspw. im Sinne einer Konsequenz für die Umsetzung im Unterricht hergestellt wird. ⇨ In diesem Fall werden die Kategorien G7.1, G7.2 oder G7.3 codiert. Zum Beispiel G7.1: *„Nachdem die Zeitdilatation u. die Längenkontraktion mit dem Lorentzfaktor erklärt wurde, würde ich in meinem Unterricht die Masse ebenso erklären.“* (L29F5)

	G7. Konsequenzen für den Unterricht ableiten
Name der Kategorie:	**G7.1 Pro *m*(*v*) im Unterricht**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass der Ansatz Pro-relativistische Masse oder ein entsprechender Teilaspekt im Unterricht dargestellt werden soll.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn im Zusammenhang mit … (1) Unterricht, oder (2) Schule, oder (3) Schüler*innen, oder (4) Lehrkräften … eine Konsequenz/Überlegung zur Umsetzung oder Auswahl (Ziele) von Inhalten gemäß des Ansatzes Pro-relativistische Masse beschrieben wird.
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„Pro-Ansicht macht für die Einführung im Unterricht Sinn“* (L9F2, Absatz 19) (2) *„Dennoch sollte mindestens der richtige, wissenschaftliche Zusammenhang in der Schule erwähnt werden.“* (S13B2) (3) *„Wenn man diesen Weg konsistent durchgeht in der Einführung, sollte er den Schülern auch schlüssig erscheinen.“* (S9B1) (4) *„Als Lehrer richte ich mich nach dem Lehrplan und den gängigen Lehrwerken.“* (L29F5)
weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn (im Unterschied zu G7.2 und G7.3) als Konsequenz bzw. Überlegung für den Unterrichtskontext beschrieben wird, den Ansatz Anti-relativistische Masse nicht zu diskutieren oder einzuführen. Zum Beispiel: *„kann man diskutieren, aber nicht in der Schule“* (L15F3)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn als Konsequenz bzw. Überlegung für den Unterrichtskontext beschrieben wird, die Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse zu diskutieren, eine Diskussion erwogen wird oder Offenheit gegenüber einer Diskussion zum Ausdruck gebracht wird. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G7.3 codiert. Zum Beispiel: *„Beide Ansätze im Unterricht zu diskutieren finde ich spannend.“* (L29F5)

Name der Kategorie:	**G7. Konsequenzen für den Unterricht ableiten** **G7.2 Anti *m*(*v*) im Unterricht**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass der Ansatz Anti-relativistische Masse oder ein entsprechender Teilaspekt im Unterricht dargestellt werden soll.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn im Zusammenhang mit … (1) Unterricht, oder (2) Schule, oder (3) Schüler*innen, oder (4) Lehrkräften … eine Konsequenz/Überlegung zur Umsetzung oder Auswahl (Ziele) von Inhalten gemäß des Ansatzes Anti-relativistische Masse beschrieben wird.
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„hätte im Unterricht vermutlich auch den Vorteil, dass SuS nicht verwirrt sind“* (S10B1) (2) *„Es muss sich an d. Schule bzw. im Land auf das Widerspruchsfreie System geeinigt werden!“* (S20B2) (3) *„Ruhemasse und m_0 entfallen → nur Masse mit SuS“* (S1B1) (4) *„Lehrperson sollte Lehrbuch prüfen und die überholten Stellen auslassen; der den SuS klar machen das es falsch/überholt ist; Verwendung der relativistischen Gleichung für $p=m\gamma v$ statt $p=mv$ damit m nicht $m\gamma$ ersetzen muss, was sonst wieder bewegte Masse (was überholt ist) wäre.“* (S1B1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn als Konsequenz bzw. Überlegung für den Unterrichtskontext beschrieben wird, die Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse zu diskutieren, eine Diskussion erwogen wird oder Offenheit gegenüber einer Diskussion zum Ausdruck gebracht wird. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G7.3 codiert. Zum Beispiel: *„Beide Ansätze im Unterricht zu diskutieren finde ich spannend.“* (L29F5)

Name der Kategorie:	**G7. Konsequenzen für den Unterricht ableiten** **G7.3 Diskussion/Problematisierung im Unterricht**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass die Problematik der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse oder entsprechende Teilaspekte im Unterricht diskutiert oder zumindest eine Rolle spielen sollen/können.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterrichtskontext die beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse oder entsprechende Teilaspekte … (1) diskutiert werden sollen, oder (2) eine Diskussion prinzipiell erwogen wird, oder (3) man einer Diskussion gegenüber offen ist und diese zulassen würde, oder (4) auf die Problematik gegensätzlicher, kontroverser Positionen hinweisen sollte bzw. diese Problematik thematisieren sollte.
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„Aufgrund dieser beiden Ansichten empfinde ich es als sinnvoll & notwendig beide Standpunkte mit den Schüler*innen zu diskutieren“* (S21B2) (2) *„Es wäre aber definitiv zu überlegen, dieses Thema als Diskussionsgrundlage zu nutzen“* (S9B1) (3) *„Allerdings sollte man einer Diskussion offen gegenüber stehen.“* (L29F5)

	(4) *„Sollte man an dieser Stelle den SuS mitteilen, dass die aktuelle Forschung dahingehend noch nicht abgeschlossen ist und das es an diesem Punkt noch keine endgültige Entscheidung über richtig und falsch gibt.“* (S1B1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn zum Ausdruck gebracht wird, dass eine Diskussion im Hinblick auf die Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse besteht/möglich ist, jedoch kein Bezug zum Unterricht hergestellt wird. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie G6.1 codiert. Zum Beispiel: „Offensichtlich ist der Diskurs hier noch nicht abgeschlossen.“ (S9B1)

Name der Kategorie:	**G7. Konsequenzen für den Unterricht ableiten** **G7.4 Überlegung zum Unterricht ohne Position/Diskussion**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird eine Konsequenz bzw. Überlegung in Zusammenhang mit einem Unterrichtskontext beschrieben, ohne dass sich positioniert wird, welcher der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse (oder entsprechende Teilaspekte) im Unterricht dargestellt werden soll und ohne eine Diskussion/Problematisierung der Ansätze im Unterricht vorzuschlagen.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn eine Konsequenz bzw. Überlegung zur Umsetzung für den Unterricht (Unterricht, Schule, Schüler*innen, Lehrkräfte) beschrieben wird, ohne dass sich (im Sinne von G7.1 oder G7.2) positioniert wird, welcher der beiden Ansätze Anti- bzw. Pro-relativistische Masse (oder entsprechende Teilaspekte) im Unterricht dargestellt werden soll und ohne eine Diskussion/Problematisierung (im Sinne von G7.3) der Ansätze im Unterricht vorzuschlagen.
Beispiele für Anwendungen:	*„vorher konkreten Standpunkt darlegen, wie eigene Position ist und diesen konsequent umsetzen“* (L10F2) *„im Unterricht sollte man sehr darauf achten, wie man mit den Begriffen umgeht und dass man keine Fehlvorstellungen begünstigt“* (S16B2)

Name der Kategorie:	**G7. Konsequenzen für den Unterricht ableiten** **G7.5 Fragestellung zur Umsetzung im Unterricht**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird eine möglicherweise offene Frage- oder Problemstellung in Zusammenhang mit einem Unterrichtskontext formuliert.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn eine Frage- oder Problemstellung formuliert wird, die in Zusammenhang mit … (1) Unterricht, oder (2) Schule, oder (3) Schüler*innen, oder (4) Lehrkräften steht. (Dabei handelt es sich nicht um eine rhetorische Frage.)
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„weiterführende Fragestellung: Wie in eigenen Unterricht darstellen/vermitteln?“* (S11B1) (3) *„Was wäre jetzt „besser“, verständlicher für Schüler?“* (L43F6)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn eine Frage- oder Problemstellung ohne Zusammenhang mit einem Unterrichtskontext formuliert wird. ⇨ In diesem Fall kommt eine Codierung der Kategorien G4.2, G5.3 oder G6.2 in Betracht.

	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ein Zusammenhang zu einem Unterrichtskontext besteht, jedoch keine Frage- oder Problemstellung formuliert wird. ⇨ In diesem Fall werden Kategorie G7.1, G7.2, G7.3 oder G7.4 codiert. Zum Beispiel G7.4: *„solche Gedanken würde ich jedoch nicht aktiv in den Unterricht einbinden“* (L37F5)

B.2 Codierleitfaden *B*: Bewertungskriterien

Allgemeiner Hinweis:

Zu beachten ist, dass Textstellen ausschließlich dann mit den unten aufgeführten Kategorien zu codieren sind, wenn ein Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse bewertet wird. Das heißt, Textstellen, bei denen kein direkter Bezug zu einem Ansatz oder einem Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse besteht, werden nicht mit den nachfolgenden Kategorien codiert.

	B1. Kriterien zur Verständlichkeit
Name der Kategorie:	**B1.1 Plausibilität (Verständlichkeit, Nachvollziehbarkeit)**
inhaltliche Beschreibung:	Die verschiedenen Positionen oder Argumente zur Geschwindigkeits-abhängigkeit der Masse werden hinsichtlich ihrer Plausibilität bewertet.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ein Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse danach bewertet wird, ob der Ansatz oder das Argument plausibel (einleuchtend, verständlich, begreiflich) ist.
Beispiele für Anwendungen:	*„Begriff d. relativistischen Masse ist plausibel“* (L5F1) *„viele Argumente der „Anti-Sicht“ leuchten ein“* (S16B2)
weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn ein Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse als nicht plausibel (unverständlich, nicht nachvollziehbar) bewertet wird. Zum Beispiel: *„Letzter Satz entweder für mich unverständlich“* (L17F3)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ein Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse nicht nur danach bewertet wird, ob der Ansatz oder das Argument verständlich oder nachvollziehbar ist, sondern, <u>wie</u> einfach oder schwer (in welchem Maße) das Verständnis des Ansatzes oder des Arguments ist. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie B1.2 codiert. Zum Beispiel: *„wenn man die „Anti-Sicht“ vertritt, dann sollte man aber genauso darauf achten, dass das Konzept somit schwieriger zu verstehen und nicht mehr ganz so eingängig ist“* (S16B2)

	B1. Kriterien zur Verständlichkeit
Name der Kategorie:	**B1.2 Einfachheit**
inhaltliche Beschreibung:	Die verschiedenen Positionen oder Argumente zur Geschwindigkeits-abhängigkeit der Masse werden hinsichtlich des Schwierigkeitsgrades (Einfachheit) ihrer Verständlichkeit bewertet.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ein Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse danach bewertet wird, wie einfach (oder schwer) verständlich der Ansatz oder das Argument ist.
Beispiele für Anwendungen:	*„Arbeit mit rel. Masse einfacher“* (L2F1) *„Pro: bekannt und (für mich) leichter Nachvollziehbar, mit Addition der relativistischen Massen“* (S7B1)
weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn ein Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse danach bewertet wird, wie schwer verständlich der Ansatz oder das Argument ist. Zum Beispiel: *„wenn man die „Anti-Sicht“ vertritt, dann sollte man aber genauso darauf achten, dass das Konzept somit schwieriger zu verstehen und nicht mehr ganz so eingängig ist“* (S16B2)

Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Einfachheit eines Ansatzes oder eines Arguments zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse danach bewertet wird, inwiefern der Ansatz oder das Argument sich zum Einsatz im Unterricht bzw. der Arbeit mit Schülern eignet. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie B2 codiert. Zum Beispiel: *„aus meiner Erfahrung heraus ist es für die Betrachtung in der Schule einfacher von der Ruhemasse auszugehen“* (L17F3)

	B1. Kriterien zur Verständlichkeit
Name der Kategorie:	**B1.3 Klarheit**
inhaltliche Beschreibung:	Die verschiedenen Positionen oder Argumente zur Geschwindigkeits-abhängigkeit der Masse werden hinsichtlich ihrer Klarheit bewertet.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ein Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse danach bewertet wird, wie klar oder unklar der Ansatz oder das Argument ist.
Beispiele für Anwendungen:	*„sehr unklar (Bedeutung der Begriffe)“* (L14F3) *„unklar → kann ich in einem Bezugssystem eine größere Masse haben als in einem anderen?“* (L36F5)

Name der Kategorie:	**B2. Unterrichts-/Schülertauglichkeit**
inhaltliche Beschreibung:	Die verschiedenen Positionen oder Argumente zur Geschwindigkeits-abhängigkeit der Masse werden hinsichtlich ihrer Eignung für den Unterricht bzw. für Schüler bewertet.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ein Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse danach bewertet wird, inwiefern der Ansatz oder das Argument sich zum Einsatz im Unterricht bzw. der Arbeit mit Schülern eignet.
Beispiele für Anwendungen:	*„Was wäre jetzt „besser“, verständlicher für Schüler?“* (L43F6) *„Pro-Ansicht macht für die Einführung im Unterricht Sinn“* (L9F2)

	B3. Kriterien des gültigen Argumentierens/Schlussfolgerns
Name der Kategorie:	**B3.1 Begründung von Aussagen**
inhaltliche Beschreibung:	Die verschiedenen Positionen oder Argumente zur Geschwindigkeits-abhängigkeit der Masse werden hinsichtlich ihrer Begründungen bewertet.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn allgemein die Begründung eines Ansatzes oder eines Arguments zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse hinsichtlich ihrer Qualität/Stärke eingeschätzt wird oder die Notwendigkeit bzw. der Mangel einer Begründung festgestellt wird.
Beispiele für Anwendungen:	*„zweites Material begründet gut, warum dort nicht der Begriff der dynamischen Masse auftaucht → aufgrund der Begründung überzeugender“* (S16B2) *„Das nicht Einführen der bewegten Masse finde ich falsch und die Begründungen nicht ausreichend“* (S10B1)

	B3. Kriterien des gültigen Argumentierens/Schlussfolgerns
Name der Kategorie:	**B3.2 Widerspruchsfreiheit**
inhaltliche Beschreibung:	Die verschiedenen Positionen oder Argumente zur Geschwindigkeits-abhängigkeit der Masse werden hinsichtlich ihrer Widerspruchsfreiheit bewertet.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ein Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse danach bewertet wird, inwiefern der Ansatz oder das Argument zu Widersprüchen führt oder frei von Widersprüchen (Konsistenz) ist.
Beispiele für Anwendungen:	*„Anti: erscheint inkonsistent, weil sich Ruhemasse mehrerer Teilchen ändert“* (S7B1) *„wenn Ruhemasse nicht eingeführt wird, dann ist das ein Widerspruch zur Formel $E=mc^2$“* (L9F2)

	B3. Kriterien des gültigen Argumentierens/Schlussfolgerns
Name der Kategorie:	**B3.3 Logik**
inhaltliche Beschreibung:	Die verschiedenen Positionen oder Argumente zur Geschwindigkeits-abhängigkeit der Masse werden hinsichtlich ihrer Schlüssigkeit/Logik bewertet.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ein Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse danach bewertet wird, inwiefern der Ansatz oder das Argument logisch/unlogisch, schlüssig/nicht schlüssig erscheint.
Beispiele für Anwendungen:	*„Die mathematischen Argumente sind nachvollziehbar und logisch.“* (S1B1) *„Gesamtenergie der Gasmenge und Masse der einzelnen Atome werden meiner Meinung nach kurzschlüssig aufeinander bezogen“* (L14F3)

	B4. spezielle Kriterien der Naturwissenschaft (Physik)
Name der Kategorie:	**B4.1 fachliche Richtigkeit**
inhaltliche Beschreibung:	Die verschiedenen Positionen oder Argumente zur Geschwindigkeits-abhängigkeit der Masse werden hinsichtlich eines Aspektes der fachlichen Richtigkeit bewertet.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ein Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse danach bewertet wird, inwiefern der Ansatz oder das Argument physikalisch bzw. mathematisch korrekt ist.
Beispiele für Anwendungen:	*„meiner Meinung nach sollten physikalische Sachverhalte den Schülern korrekt und vollständig vermittelt werden, dies bedeutet auch den Vergleich von Ruhemasse und dynamischer Masse auf entsprechendem Niveau“* (S17B2) *„Vorausgesetzt, alle math. Umformungen sind korrekt“* (L37F5)
weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn ein Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse mit dem Bestehen eines mathematischen Zusammenhanges begründet wird. Zum Beispiel: „für mich gilt $m(v) = \frac{m_0}{\sqrt{}}$“ (L12F2)

Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ein Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse danach bewertet wird, inwiefern der Ansatz oder das Argument mit den Beobachtungen bzw. Ergebnissen von Experimenten vereinbar ist. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie B4.2 codiert. Zum Beispiel: *„Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse ist experimentell erwiesen“* (L26F4) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ein Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse danach bewertet wird, inwiefern der Ansatz oder das Argument geeignet ist, bestimmte Phänomene (Beobachtungen) oder Zusammenhänge erklären, beschreiben oder verstehen zu können. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie B4.4 codiert. Zum Beispiel: *„Meiner Meinung nach ist ein Verweis auf die relativistische Masse(zunahme) notwendig, um zu erklären, dass ein Elektron auch bei hohen Beschleunigungsspannungen nie schneller als c werden kann“* (L37F5)

	B4. spezielle Kriterien der Naturwissenschaft (Physik)
Name der Kategorie:	**B4.2 Experiment/empirische Evidenz**
inhaltliche Beschreibung:	Die verschiedenen Positionen oder Argumente zur Geschwindigkeits-abhängigkeit der Masse werden hinsichtlich ihrer empirischen Grundlage durch Beobachtungen und experimentelle Ergebnisse bewertet.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ein Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse danach bewertet wird, inwiefern der Ansatz oder das Argument durch Beobachtungen bzw. Ergebnissen von Experimenten nachgewiesen werden kann bzw. mit diesen vereinbar ist.
Beispiele für Anwendungen:	*„Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse ist experimentell erwiesen“* (L26F4) *„Wie will man diese Theorie komplett ablehnen, wenn sie doch für viele Beobachtungen konsistent ist?“* (S12B2)

	B4. spezielle Kriterien der Naturwissenschaft (Physik)
Name der Kategorie:	**B4.3 Vereinbarkeit mit anderen physikalischen Theorien**
inhaltliche Beschreibung:	Die verschiedenen Positionen oder Argumente zur Geschwindigkeits-abhängigkeit der Masse werden hinsichtlich ihrer Konsistenz zu anderen Theorien oder Teilgebieten der Physik bewertet.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ein Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse danach bewertet wird, inwiefern der Ansatz oder das Argument mit anderen physikalischen Theorien vereinbar (konsistent) ist (z.B. Korrespondenzprinzip).
Beispiele für Anwendungen:	*„Die Unterscheidung zwischen Ruhemasse und bewegter Masse ist meines Erachtens richtig auch hinsichtlich der Quantenphysik die später behandelt wird.“* (L30F5) *„Argumentation ist logisch und der Vorteil liegt im Übergang zur Newtonschen Physik (Grenzfall). Ok!“* (S22B2)

Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ein Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse danach bewertet wird, inwiefern der Ansatz oder das Argument zu Widersprüchen führt oder frei von Widersprüchen (Konsistenz) ist, ohne sich dabei allerdings auf eine andere physikalische Theorie als die SRT zu beziehen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie B3.2 codiert. Zum Beispiel: *„wenn Ruhemasse nicht eingeführt wird, dann ist das ein Widerspruch zur Formel* $E=mc^2$*"* (L9F2)

	B4. spezielle Kriterien der Naturwissenschaft (Physik)
Name der Kategorie:	**B4.4 Erklärungsmächtigkeit**
inhaltliche Beschreibung:	Die verschiedenen Positionen oder Argumente zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse werden hinsichtlich ihrer Erklärungskraft bewertet.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ein Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse danach bewertet wird, inwiefern der Ansatz oder das Argument geeignet ist, bestimmte physikalische Effekte oder Zusammenhänge erklären oder verstehen zu können.
Beispiele für Anwendungen:	*„Meiner Meinung nach ist ein Verweis auf die relativistische Masse(zunahme) notwendig, um zu erklären, dass ein Elektron auch bei hohen Beschleunigungsspannungen nie schneller als c werden kann"* (L37F5) *„Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse ist experimentell erwiesen und für das Verständnis natürl. u. technischer Vorgänge erforderlich (→ Beschleuniger)"* (L26F4)
weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn ein Phänomen/eine Beobachtung als Nachweis oder Beleg für einen Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse herangezogen wird (Kategorie B4.2) und zusätzlich explizit ausgedrückt wird, dass dieser Ansatz oder das Argument das Phänomen/die Beobachtung erklären kann. Dabei wird zusätzlich Kategorie B4.4 codiert. Zum Beispiel: *„Viele Beobachtungen lassen sich am besten/einfachsten mit der relat. Massenzunahme begründen/erklären."* (L37F5)

	B4. spezielle Kriterien der Naturwissenschaft (Physik)
Name der Kategorie:	**B4.5 passende Analogie**
inhaltliche Beschreibung:	Die verschiedenen Positionen oder Argumente zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse werden danach bewertet, inwiefern eine passende Analogie zur Relativität der Zeit (Unterscheidung in Eigen- und Koordinatenzeit) besteht.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn eine Analogiebetrachtung zwischen Masse und Zeit als jeweils relative Größen (insbesondere die Argumentation im zu lesenden Material 6) positiv (bzw. als zutreffend) bewertet wird.
Beispiele für Anwendungen:	*„Nachdem die Zeitdilatation u. die Längenkontraktion mit dem Lorentzfaktor erklärt wurde, würde ich in meinem Unterricht die Masse ebenso erklären."* (L29F5) *„Der Vergleich mit der Zeitänderung macht mir sehr plausibel, dass es eine Massenänderung gibt."* (S11B1)

	B5. außer- bzw. überfachliche Kriterien
Name der Kategorie:	**B5.1 Autorität**
inhaltliche Beschreibung:	Für die Bewertung der Positionen oder der Argumente zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse wird die (z.B. wissenschaftliche oder rechtliche) Autorität einer Person oder Institution einbezogen.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ein Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse danach bewertet wird, inwiefern der Ansatz oder das Argument von (einer) bestimmten Person(en) (z.B. Wissenschaftler*in) oder Institution(en) (z.B. Lehrplan) vertreten wird.
Beispiele für Anwendungen:	*„Einstein als Genie will ich eigentlich schon glauben“* (S10B1) *„Als Lehrer richte ich mich nach dem Lehrplan und den gängigen Lehrwerken.“* (29F5)

	B5. außer- bzw. überfachliche Kriterien
Name der Kategorie:	**B5.2 Verbreitung/Aktualität des Ansatzes**
inhaltliche Beschreibung:	Die verschiedenen Positionen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse werden hinsichtlich ihrer Etablierung/Verbreitung bzw. ihrer Aktualität (in der Fachgemeinschaft) bewertet.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ein Ansatz zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse danach bewertet wird, inwiefern der Ansatz in der Fachliteratur bzw. –gemeinschaft etabliert/verbreitet oder auch aktuell ist.
Beispiele für Anwendungen:	*„Begriff „Ruhemasse“ ist aber so verbreitet, dass er vielleicht doch erwähnt werden sollte“* (S6B2) *„hat sich die Vorstellung von der Relativität der Masse doch festgesetzt und auch bewährt.“* (L22F4)
weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn ein Ansatz zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse dahingehend bewertet wird, dass er nicht (mehr) verbreitet (in der Fachgemeinschaft) ist. Zum Beispiel: *„überholte Begriffe im Schulbuch → Lehrperson sollte Lehrbuch prüfen und die überholten Stellen auslassen“* (S1B1)

	B5. außer- bzw. überfachliche Kriterien
Name der Kategorie:	**B5.3 politischer/ideologischer Einfluss**
inhaltliche Beschreibung:	Für die Bewertung der Positionen oder der Argumente zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse werden (vermutete) politische bzw. ideologische Einflüsse auf die Positionen oder Argumente einbezogen.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ein Ansatz oder ein Argument zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse danach bewertet wird, inwiefern der Ansatz oder das Argument durch Politik bzw. eine bestimmte Ideologie beeinflusst erscheint.
Beispiele für Anwendungen:	*„Man kann es sich auch leicht machen und die Leute für dumm verkaufen. Insbesondere, wenn für ein polit. System ungebildete Menschen „pflegeleichter“ sind.“* (L26F4) *„türkischer Lehrplan anti-aufklärerisch nach dem Motto: „Ich glaube nur, was ich unmittelbar wahrnehme. Alles andere ist Unsinn.“* (L14F3)

B.3 Codierleitfaden *I*: Handlungsintentionen

Lernziele

Name der Kategorie:	**IZ1. Entscheidungs-/Handlungsunfähigkeit**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass es derzeit persönlich nicht möglich ist, Lernziele zu formulieren. Aufgrund der Verunsicherung über die (fachwissenschaftliche) Berechtigung der beiden Positionen Pro- und Anti-relativistische Masse sieht sich die/der Befragte außer Stande, geeignete Lernziele zu formulieren.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn aufgrund der Konfrontation mit den beiden unterschiedlichen Ansätzen Pro- und Anti-relativistische Masse ausgedrückt wird, dass keine Lernziele formuliert werden können.
Beispiele für Anwendungen:	*„kann ich bisher nicht beantworten; müsste mich intensiver mit dem Thema beschäftigen“* (L32F5)

Name der Kategorie:	**IZ2. Pro *m*(*v*) vermitteln**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ein Lernziel formuliert, das die Relativität der Masse beinhaltet.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn das Lernziel einen der folgenden Aspekte enthält: (1) (bewegte/relativistische) Masse und Ruhemasse unterscheiden (2) Masse ist veränderlich, Massenzunahme (z.B. Berechnung) (3) Masse ist abhängig von der Geschwindigkeit eines Objektes bzw. vom Bezugssystem (Relativität der Masse, relativistische Masse) (4) Formel für die relativistischen Masse $m_r = \gamma \cdot m_0$, $\gamma \cdot m_0$ kann durch m_r ersetzt werden (5) experimenteller Nachweis *m*(*v*) (6) Diagramm zu *m*(*v*)
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„unterscheiden der Begriffe Ruhemasse und relativistische Masse“* (L16F3) (2) *„Rechnungen zur Massenzunahme am Bsp.“* (L8F2) (3) *„Die SuS sind in der Lage, die Abhängigkeit der bewegten Masse von der Geschwindigkeit zu nennen.“* (S12B2) (4) *„kennen die Formel* $m=\gamma m_0$*“* (L9F2) (5) *„die Schüler kennen exp. Möglichkeiten, mit denen man die Rel. der Masse nachweist“* (L23F4) (6) *„die Schüler können das Diagramm* $(m/m_0)(v/c)$ *interpretieren“* (L23F4)
weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn das Lernziel trotz Relativität der Masse ausdrückt, dass sich die Ruhemasse bzw. fundamentale Eigenschaften des Objektes bei Geschwindigkeitsänderung nicht verändern. Zum Beispiel: *„Die SuS wissen, dass sich bei der Zunahme der rel. Masse nicht die Eigenschaften des betrachteten Objekts (Elementarteilchenzahl o. a.) ändern. Es handelt sich „nur“ um einen Effekt, der aufgrund der relativen Betrachtungsweise entsteht.“* (S4B1)

Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn das Lernziel die Problematisierung (Schwächen/Nachteile) des Ansatzes Pro-relativistische Masse beinhaltet. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IZ3.1 codiert. Zum Beispiel: *„Die SuS kennen die Probleme mit dem Begriff der bewegten Masse“* (S16B2) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht sowohl die Pro- als auch die Anti-relativistische Masse-Perspektive dargestellt werden soll oder die Existenz verschiedener Perspektiven/ Ansätze thematisiert werden soll. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IZ3.2 codiert. Zum Beispiel: *„Die SuS kennen die Ansicht, dass sich Masse mit der Geschwindigkeit verändert. Die SuS kennen die Ansicht, dass sich Masse nicht verändert.“* (S21B2) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn das Lernziel eine (eigene) Argumentation oder Diskussion zu der Problematik der Relativität der Masse beinhaltet. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IZ4.1 codiert. Zum Beispiel: *„können Argumente zur Diskussion über die „Relativität“ der Massen nutzen“* (L7F2)

	IZ3. $m(v)$ als kontrovers behandeln
Name der Kategorie:	**IZ3.1 Probleme eines Ansatzes thematisieren**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ein Lernziel formuliert, das Probleme in Bezug auf einen der beiden Ansätze Pro- oder Anti-relativistische Masse beinhaltet.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn das Lernziel die Problematisierung (Schwächen/Nachteile) eines der beiden Ansatzes Pro- oder Anti-relativistische Masse beinhaltet.
Beispiele für Anwendungen:	*„Die SuS kennen die Probleme mit dem Begriff der bewegten Masse“* (S16B2)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn das Lernziel die Einordnung der Diskussion/des Konfliktes zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse als Kontroverse enthält, um auf die kontroverse Natur der Fragestellung/Situation aufmerksam zu machen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IZ3.3 codiert. Zum Beispiel: *„SuS »haben von der Diskussion« um die Problematik relat. Masse »gehört«“* (L37F5)

Name der Kategorie:	**IZ3. *m*(*v*) als kontrovers behandeln** **IZ3.2 Multiperspektivität aufzeigen**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ein Lernziel formuliert, das die Darstellung verschiedener Perspektiven zu der Frage nach der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse beinhaltet.
theoretische Bezüge/Verortung:	Cross & Price 1996; Hedtke 2016; Manzel 2017; Niendorf & Reitz 2019; Ohl 2013; Oulton, Dillon & Grace 2004
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht … (1) sowohl die Pro- als auch die Anti-relativistische Masse-Perspektive dargestellt werden soll oder (2) die Existenz dieser verschiedenen Perspektiven/Ansätze thematisiert werden soll.
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„- Die SuS kennen die Ansicht, dass sich Masse mit der Geschwindigkeit verändert.* *- Die SuS kennen die Ansicht, dass sich Masse nicht verändert.“* (S21B2) (2) *„… sollen erkennen, dass mit „die Masse“ als Konstrukt verschiedene Auslegungen gemeint sein können.“* (S9B1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn das Lernziel die Einordnung der Diskussion/des Konfliktes zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse als Kontroverse enthält, um auf die kontroverse Natur der Fragestellung/Situation aufmerksam zu machen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IZ3.3 codiert. Zum Beispiel: *„Gewinnen Einblick in Meinungsverschiedenheiten zur Relevanz relativist. Masse“* (L37F5)

Name der Kategorie:	**IZ3. *m*(*v*) als kontrovers behandeln** **IZ3.3 Situation als Kontroverse thematisieren**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ein Lernziel formuliert, das die Darstellung der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse als kontroverse Fragestellung/Situation beinhaltet.
theoretische Bezüge/Verortung:	Kerr et al. 2015; Ohl 2013; Oulton, Dillon & Grace 2004
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn das Lernziel die Einordnung der Diskussion/des Konfliktes zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse als Kontroverse enthält.
Beispiele für Anwendungen:	*„Gewinnen Einblick in Meinungsverschiedenheiten zur Relevanz relativist. Masse“* (S10B1) *„Die Schüler kennen den historisch gewachsenen Konflikt um die Bezeichnungen „Masse“; „relativistische Masse“, „Ruhemasse““* (L14F3)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht sowohl die Pro- als auch die Anti-relativistische Masse-Perspektive dargestellt werden soll oder die Existenz verschiedener Perspektiven/Ansätze thematisiert werden soll, ohne auf die kontroverse Natur der Fragestellung/Situation aufmerksam zu machen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IZ3.2 codiert. Zum Beispiel: *„Die SuS kennen versch. Zugänge zum Massebegriff in der Physik.“* (L21F4)

	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ein Lernziel formuliert wird, das eine (eigene) Argumentation oder Diskussion zu der Problematik der Relativität der Masse beinhaltet. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IZ4.1 codiert. Zum Beispiel: *„können Argumente zur Diskussion über die „Relativität" der Massen nutzen"* (L7F2)

	IZ4. Diskutieren/Positionieren fördern
Name der Kategorie:	**IZ4.1 *m*(*v*) diskutieren/Argumentationsfähigkeit fördern**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ein Lernziel formuliert, das eine (eigene) Argumentation oder Diskussion zu der Problematik der Relativität der Masse beinhaltet.
theoretische Bezüge/Verortung:	Archila et al. 2020; Aufschnaiter & Prechtl 2018; Gebhard, Höttecke & Rehm 2017; Heitmann & Tiemann 2011; Kerr et al. 2015; Kraus 2008; Ohl 2013; Sieve & Schanze 2012; Stradling 1984; Wodzinski 2013
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn das Lernziel einen der folgenden Aspekte enthält: (1) eigene Diskussion zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse (2) Argumente für/gegen die Relativität der Masse nutzen
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„Die SuS können einen Vor- und einen Nachteil für die Verwendung der bewegten Masse nennen."* (S12B2) (2) *„können Argumente zur Diskussion über die „Relativität" der Massen nutzen"* (L7F2)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ein Lernziel formuliert wird, das lediglich die Existenz verschiedener Perspektiven/Ansätze thematisiert, ohne diese Positionen selbst aktiv zu diskutieren. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IZ3.2 codiert. Zum Beispiel: *„Kennen der verschiedenen Interpretationsansätze"* (S5B1) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ein Lernziel formuliert wird, das lediglich die Einordnung der Diskussion/des Konfliktes zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse als Kontroverse enthält, ohne diese Positionen selbst aktiv zu diskutieren. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IZ3.3 codiert. Zum Beispiel: *„Gewinnen Einblick in Meinungsverschiedenheiten zur Relevanz relativist. Masse"* (S10B1) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn das Lernziel eine eigene Positionierung (Meinung/Sichtweise) zu der Problematik der Relativität der Masse beinhaltet. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IZ4.2 codiert. Zum Beispiel: *„Die SuS können sich aufgrund von Materialien selbst ein Bild machen und sich positionieren"* (S21B2)

Name der Kategorie:	**IZ4. Diskutieren/Positionieren fördern** **IZ4.2 Positionierung der Schüler*innen fördern**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ein Lernziel formuliert, das eine eigene Positionierung zu der Problematik der Relativität der Masse beinhaltet.
theoretische Bezüge/Verortung:	Oulton, Dillon & Grace 2004
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn das Lernziel eine eigene Positionierung (Meinung/Sichtweise) zu der Problematik der Relativität der Masse beinhaltet.
Beispiele für Anwendungen:	*„Die SuS können sich aufgrund von Materialien selbst ein Bild machen und sich positionieren“* (S21B2) *„wählen eine geeignete Betrachtungsweise“* (S20B2)
weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn das Lernziel zusätzlich zur Diskussion der beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse oder der Nutzung von Argumenten für/gegen die Relativität der Masse eine explizite Positionierung zu der Frage der Relativität der Masse beinhaltet. ⇨ In diesem Fall werden Kategorie IZ4.1 und Kategorie IZ4.2 codiert. Zum Beispiel: *„Die SuS können sich positionieren mit Hilfe von Argumente für bzw. gegen die Invarianz der Masse.“* (L21F4)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn das Lernziel leidglich eine Diskussion der beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse oder die Nutzung von Argumenten für/gegen die Relativität der Masse beinhaltet, ohne eine explizite Positionierung zu der Frage der Relativität der Masse einzuschließen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IZ4.1 codiert. Zum Beispiel: *„können Argumente zur Diskussion über die „Relativität“ der Massen nutzen“* (L7F2)

Vorschlag zum Vorgehen im Unterricht (Vignette 1)

Name der Kategorie:	**IU1. Entscheidungs-/Handlungsunfähigkeit**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass es derzeit persönlich nicht möglich ist, Handlungsintentionen zu formulieren. Aufgrund der Verunsicherung über die (fachwissenschaftliche) Berechtigung der beiden Positionen Pro- und Anti-relativistische Masse sieht sich die/der Befragte außer Stande, geeignete Handlungsintentionen zu formulieren.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn aufgrund der Konfrontation mit den beiden unterschiedlichen Ansätzen Pro- und Anti-relativistische Masse ausgedrückt wird, dass zum jetzigen Zeitpunkt keine Handlungsintentionen formuliert werden können.
Beispiele für Anwendungen:	*„Da muss ich eine Nacht drüber schlafen.“* (L8F2) *„Zu allen Situationen: Keine Ahnung, das Material hat mich endgültig verwirrt.“* (S3B1)

Name der Kategorie:	**IU2. Kontroversität vermeiden**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass die Darstellung verschiedener Betrachtungsweisen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse im Unterrichtskontext vermieden werden soll.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass die beiden Positionen Pro- und Anti-relativistische Masse bzw. die kontroverse Problematik zur Relativität der Masse nicht im Unterricht dargestellt werden sollen.
Beispiele für Anwendungen:	*„Um die Schüler nicht zu verwirren bzw. zu verunsichern, würde ich die Diskussion bzgl. der Sinnhaftigkeit des Begriffs „relativistische Masse“ auch gar nicht erwähnen.“* (L22F4) *„Mit der Diskussion beider Theorien kann sich die Uni auseinandersetzen.“* (S2B1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass in der (jeweiligen) Schule ein einheitliches Vorgehen der Lehrkräfte bei der Behandlung der Relativität der Masse im Unterricht bestehen sollte, aber dabei nicht explizit geäußert wird, dass nur genau eine der beiden Positionen dargestellt werden soll. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IU5 codiert. Zum Beispiel: *„Ja, ich finde es muss für uns als Lehrkräfte eindeutig festgelegt sein“* (S8B1)

Name der Kategorie:	**IU3. Pro *m*(*v*) vermitteln**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird eine Handlungsintention formuliert, die Pro-relativistische Masse Position zu vermitteln.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn der Unterricht die Vermittlung einen der folgenden Aspekte beinhalten soll: (1) (bewegte/relativistische) Masse und Ruhemasse unterscheiden (2) Masse ist veränderlich, Massenzunahme (3) Masse ist abhängig von der Geschwindigkeit eines Objektes bzw. vom Bezugssystem (Relativität der Masse, relativistische Masse) (4) Formel für die relativistischen Masse $m_r = \gamma \cdot m_0$, $\gamma \cdot m_0$ kann durch m_r ersetzt werden (5) die aktuell (im Schulkontext) verbreitete Position zur Relativität der Masse (z.B. Lehrplan, Lehrbücher) (6) Unterrichtsthema „Relativität der Masse“ wie bisher behandeln (7) unterrichten einer bestimmten Position zur Relativität der Masse, wenn die eigene Position des/der Befragten Pro *m*(*v*)
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„Ich würde den SuS den Unterschied zw. Ruhe- u. relativistischer Masse erklären“* (S10B1) (2) *„Ich würde es unterrichten mit der relativistischen Massenzunahme“* (L38F6) (3) *„Ich würde trotzdem von der rel. Masse im Unterricht sprechen“* (S4B1) (4) *„$m=\gamma m_0$ - lässt sich aus den Postulaten herleiten“* (L19F3) (5) *„gebe ich den Schülern die aktuelle Lehrmeinung „an die Hand““* (L29F5) (6) *„Morgen behandelst du das Thema wie gewohnt“* (L24F4) (7) *„man nimmt als Lehrer selbst vorher eine Position ein und vermittelt diese begründet (durch Beispiele/Experimente) den SuS.“* (S6B1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht eine Problematisierung (Schwächen/Nachteile) des Ansatzes Pro-relativistische Masse stattfinden soll. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IU8.2 codiert. Zum Beispiel: *„Man kann ja auf die damit verbundenen Probleme hinweisen“* (L26F4) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht sowohl die Pro- als auch die Anti-relativistische Masse-Perspektive dargestellt werden soll oder die Existenz verschiedener Perspektiven/Ansätze thematisiert werden soll. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IU8.3 codiert. Zum Beispiel: *„Ich würde den Schülern aber beide Ansichten näher bringen“* (S9B1) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn das Lernziel eine (eigene) Argumentation oder Diskussion zu der Problematik der Relativität der Masse beinhaltet. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IU9.1 codiert. Zum Beispiel: *„Man könnte die Diskussion, ob der Begriff der rel. Masse sinnvoll ist oder nicht, zum Unterrichtsthema machen“* (S4B1)

Name der Kategorie:	**IU4. Anti $m(v)$ vermitteln**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird eine Handlungsintention formuliert, die Anti-relativistische Masse Position zu vermitteln.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht die Masse als invariante Größe vermittelt werden soll bzw. auf die Relativität der Masse verzichtet werden soll.
Beispiele für Anwendungen:	*„Einführung d. Masse als invariante Größe“* (L7F2) *„Ich würde die Herangehensweise ohne rel. Masse verwenden, weil ein Anstieg der Energie bzw. des Impulses leichter zu verstehen ist.“* (S14B2)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht sowohl die Pro- als auch die Anti-relativistische Masse-Perspektive dargestellt werden soll oder die Existenz verschiedener Perspektiven/Ansätze thematisiert werden soll. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IU8.3 codiert. Zum Beispiel: *„Ich würde den Schülern aber beide Ansichten näher bringen“* (S9B1)

Name der Kategorie:	**IU5. Einheitlichkeit in der Schule**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass in der (jeweiligen) Schule eine einheitliche Vorgehensweise bei der Behandlung der Relativität der Masse im Unterricht herrschen sollte.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass in der (jeweiligen) Schule ein einheitliches Vorgehen der verschiedenen Lehrkräfte bei der Behandlung der Relativität der Masse im Unterricht bestehen sollte.
Beispiele für Anwendungen:	*„Einigung innerhalb der Fachschaft auf einen Weg des Herangehens.“* (L24F4) *„Ja, ich finde es muss für uns als Lehrkräfte eindeutig festgelegt sein“* (S8B1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht die Pro-relativistische Masse Position vermittelt werden soll. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IU3 codiert. Zum Beispiel: *„Ich würde mich an den Lehrplan halten und von der Relativität der Masse sprechen, basierend auf dem Relativitätsprinzip.“* (L20F3)

Name der Kategorie:	**IU6. Informationen zusammentragen** **IU6.1 Schüler*innen recherchieren/tragen Informationen zusammen**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass die Schüler*innen Informationen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse sammeln sollen.
theoretische Bezüge/Verortung:	Cross & Price 1996; Gebhard, Höttecke & Rehm 2017; Höttecke 2013; Oulton, Dillon & Grace 2004; Wodzinski 2013
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass die Schüler*innen Informationen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse selbst recherchieren oder zusammentragen sollen.
Beispiele für Anwendungen:	*„vielleicht Internetrecherche.“* (S8B1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass statt der Schüler*innen die Lehrkraft selbst Informationen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse sammeln soll. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IU6.2 codiert. Zum Beispiel: *„als L. sollte man sie mit entsprechenden Argumenten „versorgen““* (L41F6)

Name der Kategorie:	**IU6. Informationen zusammentragen** **IU6.2 Lehrkraft recherchiert selbst**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass man als Lehrkraft selbst Informationen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse sammeln möchte.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass die Lehrkraft selbst Informationen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse recherchieren oder zusammentragen möchte.
Beispiele für Anwendungen:	*„als L. sollte man sie mit entsprechenden Argumenten „versorgen““* (L41F6)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass statt der Lehrkraft selbst die Schüler*innen Informationen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse sammeln sollen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IU6.1 codiert. Zum Beispiel: *„vielleicht Internetrecherche.“* (S8B1)

Name der Kategorie:	**IU7. kritische Haltung fördern**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass sich die Schüler*innen im Unterricht kritisch mit Inhalten auseinandersetzen sollen.
theoretische Bezüge/Verortung:	Heinicke 2014; Oulton, Dillon & Grace 2004
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass die Schüler*innen im Unterricht lernen sollen, Inhalte kritisch zu beurteilen oder zu hinterfragen.
Beispiele für Anwendungen:	*„Aber als Lehrer müssen wir die Schüler dazu anhalten Themen kritisch zu betrachten“* (L9F2) *„die Möglichkeit bieten, sich kritisch mit einem wissenschaftl. Inhalt auseinanderzusetzen“* (S9B1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht eine konkrete Problematisierung (Schwächen/Nachteile) eines der beiden Ansätze Pro- oder Anti-relativistische Masse stattfindet, ohne dass dabei explizit eine kritische Grundhaltung im Vordergrund steht. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IU8.2 codiert. Zum Beispiel: *„Man kann ja auf die damit verbundenen Probleme hinweisen“* (L26F4)

Name der Kategorie:	**IU8. *m*(*v*) als kontrovers behandeln** **IU8.1 Offenheit signalisieren**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass man als Lehrkraft offen bzw. unvoreingenomm-en gegenüber verschiedenen Standpunkten zur Geschwindigkeitsabhängig-keit der Masse ist.
theoretische Bezüge/Verortung:	Kerr et al. 2015; Hedtke 2016; Heitmann & Tiemann 2011; Niendorf & Reitz 2019
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht die verschiedenen Positionen Pro- oder Anti-relativistische Masse nicht aufgrund einer vorgefertigten eigenen Meinung als „richtig“ oder „falsch“ beurteilt werden, sondern Offenheit bzw. Toleranz in Bezug auf die verschiedenen Standpunkte besteht.
Beispiele für Anwendungen:	*„Da offensichtlich keine der Ansichten „richtig“ oder „falsch“ ist“* (L26F4) *„Oder sie finden wie ich, weiter beide Seiten spannend“* (L21F4)
weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn zusätzlich zur Offenheit bzw. Toleranz gegenüber den verschiedenen Positionen Pro- und Anti-relativistische Masse ausgedrückt wird, dass diese beiden unterschied-lichen Perspektiven explizit dargestellt werden sollen oder die Existenz dieser verschiedenen Perspektiven/Ansätze thematisiert werden soll. ⇨ In diesem Fall werden Kategorie IU8.1 und Kategorie IU8.3 codiert. Zum Beispiel: *„Dennoch empfinde ich es als richtig und wichtig den Schüler*innen auch hier nichts vorzuenthalten, sondern beide Seiten als aktuell gleichberechtigt wahr/falsch darzustellen“* (S21B2)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn im Unterricht zwar verschiedene Perspektiven zu der Frage nach der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse dargestellt werden sollen, allerdings ohne explizit Offenheit bzw. Toleranz in Bezug auf die verschiedenen Standpunkte auszudrücken, so dass nicht die Akzeptanz dieser Standpunkte im Vordergrund steht, sondern deren Vielfältigkeit. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IU8.3 codiert. Zum Beispiel: *„Ich würde den Schülern aber beide Ansichten näher bringen“* (S9B1)

Name der Kategorie:	**IU8. *m*(*v*) als kontrovers behandeln** **IU8.2 Probleme eines Ansatzes thematisieren**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass Probleme in Bezug auf einen der beiden Ansätze Pro- oder Anti-relativistische Masse im Unterricht thematisiert werden sollen.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht eine Problematisierung (Schwächen/Nachteile) eines der beiden Ansätze Pro- oder Anti-relativistische Masse stattfindet.
Beispiele für Anwendungen:	*„Man kann ja auf die damit verbundenen Probleme hinweisen“* (L26F4) *„zeige aber auch augenscheinliche Widersprüche auf.“* (L29F5)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Schüler*innen im Unterricht die Diskussion/den Konflikt zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse kennen lernen sollen, um auf die kontroverse Natur der Fragestellung/Situation aufmerksam zu machen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IU8.4 codiert. Zum Beispiel: *„Allerdings würde ich auch die Zwiespältigkeit dieses Themas hervorheben und versuchen in Ansätzen zu erklären, warum es nicht so eindeutig ist.“* (S19B2)

Name der Kategorie:	**IU8. *m*(*v*) als kontrovers behandeln** **IU8.3 Multiperspektivität aufzeigen**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass im Unterricht verschiedene Perspektiven zu der Frage nach der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse dargestellt werden sollen.
theoretische Bezüge/Verortung:	Cross & Price 1996; Hedtke 2016; Manzel 2017; Niendorf & Reitz 2019; Ohl 2013; Oulton, Dillon & Grace 2004
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht … (1) sowohl die Pro- als auch die Anti-relativistische Masse-Perspektive dargestellt werden soll, (2) die Existenz dieser verschiedenen Perspektiven/Ansätze thematisiert werden soll oder (3) verschiedene Quellen studiert werden sollen.
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„Ich würde den Schülern aber beide Ansichten näher bringen“* (S9B1) (2) *„Sich auf ein Lehrbuch konzentrieren (möglichst auf das LB, mit dem man arbeitet), aber auch die Schüler darauf hinweisen, dass es andere Meinungen bzw. Ausführungen zum Thema gibt.“* (L4F1) (3) *„Hier bietet sich die große Chance, mal mehrere Lehrbücher in ihren Aussagen zu vergleichen.“* (L1F1)
weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn zusätzlich zur Darstellung der beiden unterschiedlichen Perspektiven oder der Thematisierung der Existenz dieser verschiedenen Perspektiven/Ansätze Offenheit bzw. Toleranz gegenüber den verschiedenen Positionen Pro- und Anti-relativistische Masse ausgedrückt wird.

	⇨ In diesem Fall werden Kategorie IU8.3 und Kategorie IU8.1 codiert. Zum Beispiel: *„Dennoch empfinde ich es als richtig und wichtig den Schüler*innen auch hier nichts vorzuenthalten, sondern beide Seiten als aktuell gleichberechtigt wahr/falsch darzustellen“* (S21B2)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Schüler*innen im Unterricht die Diskussion/den Konflikt zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse kennen lernen sollen, um auf die kontroverse Natur der Fragestellung/Situation aufmerksam zu machen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IU8.4 codiert. Zum Beispiel: *„Allerdings würde ich auch die Zwiespältigkeit dieses Themas hervorheben und versuchen in Ansätzen zu erklären, warum es nicht so eindeutig ist.“* (S19B2)

	IU8. $m(v)$ als kontrovers behandeln
Name der Kategorie:	**IU8.4 Situation als Kontroverse thematisieren**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse als kontroverse Fragestellung/Situation dargestellt werden soll.
theoretische Bezüge/Verortung:	Kerr et al. 2015; Ohl 2013; Oulton, Dillon & Grace 2004
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn die Schüler*innen im Unterricht die Diskussion/den Konflikt zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse als Kontroverse kennen lernen sollen.
Beispiele für Anwendungen:	*„Allerdings würde ich auch die Zwiespältigkeit dieses Themas hervorheben und versuchen in Ansätzen zu erklären, warum es nicht so eindeutig ist.“* (S19B2) *„am Ende der Lerneinheit einen Ausblick geben, welche Meinungsverschiedenheiten zum Thema existieren“* (S10B1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht sowohl die Pro- als auch die Anti-relativistische Masse-Perspektive dargestellt werden soll, die Existenz verschiedener Perspektiven/Ansätze thematisiert werden soll oder verschiedene Quellen studiert werden sollen, ohne auf die kontroverse Natur der Fragestellung/ Situation aufmerksam zu machen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IU8.3 codiert. Zum Beispiel: *„Ich würde den Schülern aber beide Ansichten näher bringen“* (S9B1) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Schüler*innen im Unterricht selbst zu der Problematik der Relativität der Masse diskutieren bzw. argumentieren sollen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IU9.1 codiert. Zum Beispiel: *„S diskutieren lassen über verschiedene Ansichten“* (L7F2)

	IU9. Diskutieren/Positionieren fördern
Name der Kategorie:	**IU9.1 *m*(*v*) diskutieren/Argumentationsfähigkeit fördern**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass die Schüler*innen im Unterricht selbst zu der Problematik der Relativität der Masse diskutieren bzw. argumentieren sollen.
theoretische Bezüge/Verortung:	Archila et al. 2020; Aufschnaiter & Prechtl 2018; Gebhard, Höttecke & Rehm 2017; Heitmann & Tiemann 2011; Kerr et al. 2015; Kraus 2008; Ohl 2013; Sieve & Schanze 2012; Stradling 1984; Wodzinski 2013
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass die Schüler*innen im Unterricht … (1) selbst zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse diskutieren oder (2) Argumente für/gegen die Relativität der Masse nutzen.
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„S diskutieren lassen über verschiedene Ansichten“* (L7F2) (2) *„lernen Argumente für ein „dafür“ bzw. „dagegen“ zu finden“* (L9F2)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn lediglich ausgedrückt wird, dass im Unterricht sowohl die Pro- als auch die Anti-relativistische Masse-Perspektive dargestellt werden soll oder die Existenz verschiedener Perspektiven/Ansätze thematisiert werden soll, ohne diese Positionen selbst aktiv zu diskutieren. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IU8.3 codiert. Zum Beispiel: *„Ich würde den Schülern aber beide Ansichten näher bringen“* (S9B1) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass die Schüler*innen im Unterricht die Diskussion/den Konflikt zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse als Kontroverse kennen lernen sollen, jedoch ohne diese Positionen selbst aktiv zu diskutieren. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IU8.4 codiert. Zum Beispiel: *„am Ende der Lerneinheit einen Ausblick geben, welche Meinungsverschiedenheiten zum Thema existieren“* (S10B1) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass sich die Schüler*innen im Unterricht selbst zu der Problematik der Relativität der Masse positionieren (eigene Meinung/Sichtweise) sollen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IU9.2 codiert. Zum Beispiel: *„S. sollten sich im Unterricht positionieren“* (L41F6)

Name der Kategorie:	**IU9. Diskutieren/Positionieren fördern** **IU9.2 Positionierung der Schüler*innen fördern**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass sich die Schüler*innen im Unterricht selbst zu der Problematik der Relativität der Masse positionieren sollen.
theoretische Bezüge/Verortung:	Oulton, Dillon & Grace 2004
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass sich die Schüler*innen im Unterricht selbst zu der Problematik der Relativität der Masse positionieren (eigene Meinung/Sichtweise) sollen.
Beispiele für Anwendungen:	*„S. sollten sich im Unterricht positionieren“* (L41F6) *„die jungen Erwachsenen bauen sich selbst ihr Bild und ihre Überzeugung“* (L21F4)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn leidglich ausgedrückt wird, dass die Schüler*innen im Unterricht selbst zu der Problematik der Relativität der Masse diskutieren bzw. argumentieren sollen, jedoch ohne sich dabei selbst explizit zu der Frage der Relativität der Masse zu positionieren. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IU9.1 codiert. Zum Beispiel: *„S diskutieren lassen über verschiedene Ansichten“* (L7F2)

Name der Kategorie:	**IU10. NoS-Aspekte thematisieren**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass im Unterricht Nature-of-Science-Aspekte thematisiert werden sollen.
theoretische Bezüge/Verortung:	Albe 2008; Dascal 2006; Kipnis 2001; Zeidler et al. 2005
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht Nature-of-Science-Aspekte thematisiert werden sollen, wie bspw.: (1) Vorläufigkeit naturwissenschaftlichen Wissens (2) Entwicklung des naturwissenschaftlichen Wissens (3) Möglichkeiten und Grenzen der Physik als Naturwissenschaft
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„in d. modernen Physik sind nicht alle Erkenntnisse sicher, dass sollten die Schüler auch erkennen“* (L2F1) (2) *„darauf verwiesen werden, dass sich bestimmte Erkenntnisse entwickeln“* (L10F2) (3) *„den Schülern klarmachen, dass es sich um eine Theorie handelt, es gibt Probleme, die noch ungelöst sind“* (L13F2)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Schüler*innen im Unterricht die Diskussion/den Konflikt zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse kennen lernen sollen, um auf die kontroverse Natur der Fragestellung/Situation aufmerksam zu machen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie IU8.4 codiert. Zum Beispiel: *„Allerdings würde ich auch die Zwiespältigkeit dieses Themas hervorheben und versuchen in Ansätzen zu erklären, warum es nicht so eindeutig ist.“* (S19B2)

B.4 Codierleitfaden *H*: Handlungsmöglichkeiten

Umsetzung im Unterricht (Vignetten 2A & 2B)

Name der Kategorie:	**HU1. Entscheidungs-/Handlungsunfähigkeit**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass es derzeit persönlich nicht möglich ist, Handlungsmöglichkeiten zu formulieren. Aufgrund der Verunsicherung über die (fachwissenschaftliche) Berechtigung der beiden Positionen Pro- und Anti-relativistische Masse sieht sich die/der Befragte außer Stande, geeignete Handlungsmöglichkeiten zu formulieren.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn aufgrund der Konfrontation mit den beiden unterschiedlichen Ansätzen Pro- und Anti-relativistische Masse ausgedrückt wird, dass zum jetzigen Zeitpunkt keine Handlungsmöglichkeiten formuliert werden können.
Beispiele für Anwendungen:	*„da ich selbst nicht weiß ↗ vorige Ausführungen, kann ich mich hier nicht weiter äußern“* (L24F4)

Name der Kategorie:	**HU2. Kontroversität vermeiden**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass die Darstellung verschiedener Betrachtungsweisen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse im Unterricht vermieden werden soll.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass die beiden Positionen Pro- und Anti-relativistische Masse bzw. die kontroverse Problematik zur Relativität der Masse nicht im Unterricht dargestellt werden sollen.
Beispiele für Anwendungen:	*„So eine HA würde ich nicht stellen und mich auf solche Probleme nicht einlassen.“* (L5F1) *„S3: es ist geklärt! S4: Es gibt eine klare Antwort.“* (S4B1)

Name der Kategorie:	**HU3. Pro $m(v)$ vermitteln**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird eine Handlungsmöglichkeit formuliert, die Pro-relativistische Masse Position zu vermitteln.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn der Unterricht die Vermittlung einen der folgenden Aspekte beinhalten soll: (1) (bewegte/relativistische) Masse und Ruhemasse unterscheiden (2) Masse ist veränderlich, Massenzunahme (3) Masse ist abhängig von der Geschwindigkeit eines Objektes bzw. vom Bezugssystem (Relativität der Masse, relativistische Masse) (4) die aktuell (im Schulkontext) verbreitete Position zur Relativität der Masse (z.B. Lehrplan, Lehrbücher) (5) unterrichten einer bestimmten Position zur Relativität der Masse, wenn die eigene Position des/der Befragten Pro $m(v)$

Beispiele für Anwendungen:	(1) *„Begriffsklärung: Masse, Ruhemasse, relativistische Masse“* (L6F1) (2) *„Ab einer gewissen Geschwindigkeit kann sich die Masse nicht mehr verändern, da hast du Recht“* (S17B2) (3) *„Es gibt unterschiedliche Betrachtungsweisen, aber wir betrachten die Abhängigkeit vom Bezugssystem“* (L9F2) (4) *„Stärkung von S1 weil LB- und LP-konform, meiner eigenen Auffassung entsprechend und offenbar (meiner Kenntnis nach) die gängigere Lehrmeinung ist“* (L37F5) (5) *„begründete Stellungnahme der Lehrkraft“* (S6B1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht eine Problematisierung (Schwächen/Nachteile) des Ansatzes Pro-relativistische Masse stattfinden soll. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HU7.2 codiert. Zum Beispiel: *„Der Begriff der „rel. Masse“ ist schwer nachzuvollziehen, weshalb man dazu übergegangen ist, diesen Begriff nicht mehr zu verwenden“* (S14B2) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht sowohl die Pro- als auch die Anti-relativistische Masse-Perspektive dargestellt werden soll oder die Existenz verschiedener Perspektiven/Ansätze thematisiert werden soll. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HU7.3 codiert. Zum Beispiel: *„Vor- und Nachteile beider Sichtweisen herausarbeiten“* (S16B2)

Name der Kategorie:	**HU4. Anti $m(v)$ vermitteln**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird eine Handlungsmöglichkeit formuliert, die Anti-relativistische Masse Position zu vermitteln.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht die Masse als invariante Größe vermittelt werden soll bzw. auf die Relativität der Masse verzichtet werden soll.
Beispiele für Anwendungen:	*„bei einer Bewegung mit v → c steigt der Impuls bzw. die Energie“* (S14B2)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht sowohl die Pro- als auch die Anti-relativistische Masse-Perspektive dargestellt werden soll oder die Existenz verschiedener Perspektiven/Ansätze thematisiert werden soll. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HU7.3 codiert. Zum Beispiel: *„Vor- und Nachteile beider Sichtweisen herausarbeiten“* (S16B2)

Name der Kategorie:	**HU5. Informationsklarheit gewinnen** **HU5.1 Informationen zusammentragen** HU5.1.1 Schüler*innen recherchieren/tragen Informationen zusammen
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass die Schüler*innen Informationen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse sammeln sollen.
theoretische Bezüge/Verortung:	Cross & Price 1996; Gebhard, Höttecke & Rehm 2017; Höttecke 2013; Oulton, Dillon & Grace 2004; Wodzinski 2013
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass die Schüler*innen Informationen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse selbst recherchieren oder zusammentragen sollen.

Beispiele für Anwendungen:	*„Dann würde ich die Frage in die Klasse geben, wer welche Rechercheergebnisse gefunden hat“* (S9B1) *„evtl. die Kontexte nochmal recherchieren“* (S21B2)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass statt der Schüler*innen die Lehrkraft selbst Informationen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse sammeln möchte. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HU5.1.2 codiert. Zum Beispiel: *„recherchiere selbst nochmal. Nächste Stunde kann ich dazu etwas sagen.“* (L1F1)

Name der Kategorie:	**HU5. Informationsklarheit gewinnen** **HU5.1 Informationen zusammentragen** HU5.1.2 Lehrkraft recherchiert selbst
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass man als Lehrkraft selbst Informationen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse sammeln möchte.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass die Lehrkraft selbst Informationen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse recherchieren möchte.
Beispiele für Anwendungen:	*„recherchiere selbst nochmal. Nächste Stunde kann ich dazu etwas sagen.“* (L1F1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass statt der Lehrkraft selbst die Schüler*innen Informationen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse sammeln sollen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HU5.1.1 codiert. Zum Beispiel: *„Dann würde ich die Frage in die Klasse geben, wer welche Rechercheergebnisse gefunden hat“* (S9B1)

Name der Kategorie:	**HU5. Informationsklarheit gewinnen** **HU5.2 Informations-/Wissensmangel explizieren**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass bestimmte Informationen nicht bekannt sind bzw. bisher nicht bekannt gewesen sind.
theoretische Bezüge/Verortung:	Ohl 2013
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn im Unterricht gegenüber den Schüler*innen ausgedrückt wird, dass bestimmte Informationen nicht bekannt sind bzw. bisher nicht bekannt gewesen sind.
Beispiele für Anwendungen:	*„Vielleicht gibt es noch immer diese Diskussion in der Wissenschaft!?“* (L43F6) *„S2´s Auffassung habe ich bisher nicht wahrgenommen“* (L1F1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass die Lehrkraft selbst oder die Schüler*innen Informationen zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse recherchieren sollen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HU5.1.1 oder Kategorie HU5.1.2 codiert. Zum Beispiel: *„recherchiere selbst nochmal. Nächste Stunde kann ich dazu etwas sagen.“* (L1F1)

Name der Kategorie:	**HU5. Informationsklarheit gewinnen** **HU5.3 Quellenbewusstsein fördern**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass im Unterricht ein Bewusstsein für die Quellen von Informationen vermittelt wird.
theoretische Bezüge/Verortung:	Eilks, Marks & Burmeister 2012; Gebhard, Höttecke & Rehm 2017; Ohl 2013; Wodzinski 2013
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht die Fundierung von Informationen durch Angabe der Quellen oder die Qualität von Quellen (Glaubwürdigkeit) thematisiert wird.
Beispiele für Anwendungen:	*„Quellenangaben erforderlich"* (L28F4) *„zu S2: Grundsätzlich Internet als kritische Quelle betrachten → wo gelesen? Eine Uniseite, ein Forum, … ?"* (S12B2)

Name der Kategorie:	**HU6. kritische Haltung fördern**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass man sich kritisch mit Inhalten auseinandersetzen sollte.
theoretische Bezüge/Verortung:	Heinicke 2014; Oulton, Dillon & Grace 2004
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn im Unterricht ausgedrückt wird, dass Inhalte kritisch beurteilt oder hinterfragt werden sollten.
Beispiele für Anwendungen:	*„gut: Kritik an beiden Begriffen"* (S18B2) *„Man sollte beide Schüler unterstützen und gleichzeitig hinterfragen."* (L21F4)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht eine konkrete Problematisierung (Schwächen/Nachteile) eines der beiden Ansätze Pro- oder Anti-relativistische Masse stattfindet, ohne dass dabei explizit eine kritische Grundhaltung im Vordergrund steht. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HU7.2 codiert. Zum Beispiel: *„Der Begriff der „rel. Masse" ist schwer nachzuvollziehen, weshalb man dazu übergegangen ist, diesen Begriff nicht mehr zu verwenden"* (S14B2)

Name der Kategorie:	**HU7. $m(v)$ als kontrovers behandeln** **HU7.1 Offenheit signalisieren**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass man als Lehrkraft offen bzw. unvoreingenommen gegenüber verschiedenen Standpunkten zur Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse ist.
theoretische Bezüge/Verortung:	Kerr et al. 2015; Hedtke 2002; Heitmann & Tiemann 2011; Niendorf & Reitz 2019
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht die verschiedenen Positionen Pro- oder Anti-relativistische Masse nicht aufgrund einer vorgefertigten eigenen Meinung als „richtig" oder „falsch" beurteilt werden, sondern Offenheit bzw. Toleranz in Bezug auf die verschiedenen Standpunkte besteht.
Beispiele für Anwendungen:	*„Es gibt kein absolutes RICHTIG oder FALSCH!"* (L37F5) *„Ich würde beiden Schülern rechtgeben"* (L26F4)

Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn im Unterricht zwar verschiedene Perspektiven zu der Frage nach der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse dargestellt werden sollen, allerdings ohne explizit Offenheit bzw. Toleranz in Bezug auf die verschiedenen Standpunkte auszudrücken, so dass nicht die Akzeptanz dieser Standpunkte im Vordergrund steht, sondern deren Vielfältigkeit. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HU7.3 codiert. Zum Beispiel: *„Vor- und Nachteile beider Sichtweisen herausarbeiten“* (S16B2)

Name der Kategorie:	**HU7. $m(v)$ als kontrovers behandeln** **HU7.2 Probleme eines Ansatzes thematisieren**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass Probleme in Bezug auf einen der beiden Ansätze Pro- oder Anti-relativistische Masse im Unterricht thematisiert werden sollen.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht eine Problematisierung (Schwächen/Nachteile) eines der beiden Ansätze Pro- oder Anti-relativistische Masse stattfindet.
Beispiele für Anwendungen:	*„Der Begriff der „rel. Masse“ ist schwer nachzuvollziehen, weshalb man dazu übergegangen ist, diesen Begriff nicht mehr zu verwenden“* (S14B2) *„S2 – eine, von (einigen) Wissenschaftlern vertretene Theorie, mit der man bestimmte Beobachtungen nicht so schlüssig erklären kann“* (L37F5)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Schüler*innen im Unterricht die Diskussion/den Konflikt zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse kennen lernen sollen, um auf die kontroverse Natur der Fragestellung/Situation aufmerksam zu machen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HU7.4 codiert. Zum Beispiel: *„Ich würde sagen, dass diese beiden gegenteiligen Meinungen momentan unter den Physikern kontrovers diskutiert werden, es noch keine einheitliche „neue“ Lehrmeinung gibt.“* (L22F4)

Name der Kategorie:	**HU7. $m(v)$ als kontrovers behandeln** **HU7.3 Multiperspektivität aufzeigen**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass im Unterricht verschiedene Perspektiven zu der Frage nach der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse dargestellt werden sollen.
theoretische Bezüge/Verortung:	Cross & Price 1996; Hedtke 2002; Manzel 2017; Niendorf & Reitz 2019; Ohl 2013; Oulton, Dillon & Grace 2004
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht … (1) sowohl die Pro- als auch die Anti-relativistische Masse-Perspektive dargestellt werden soll, (2) die Existenz dieser verschiedenen Perspektiven/Ansätze thematisiert werden soll oder
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„Vor- und Nachteile beider Sichtweisen herausarbeiten“* (S16B2) (2) *„Es gibt unterschiedliche Betrachtungsweisen“* (L9F2)

Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Schüler*innen im Unterricht die Diskussion/den Konflikt zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse kennen lernen sollen, um auf die kontroverse Natur der Fragestellung/Situation aufmerksam zu machen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HU7.4 codiert. Zum Beispiel: *„Ich würde sagen, dass diese beiden gegenteiligen Meinungen momentan unter den Physikern kontrovers diskutiert werden, es noch keine einheitliche „neue" Lehrmeinung gibt."* (L22F4)

	HU7. *m*(*v*) als kontrovers behandeln
Name der Kategorie:	**HU7.4 Situation als Kontroverse thematisieren**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse als kontroverse Fragestellung/Situation dargestellt werden soll.
theoretische Bezüge/Verortung:	Kerr et al. 2015; Ohl 2013; Oulton, Dillon & Grace 2004
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn die Schüler*innen im Unterricht die Diskussion/den Konflikt zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse als Kontroverse kennen lernen sollen.
Beispiele für Anwendungen:	*„Ich würde sagen, dass diese beiden gegenteiligen Meinungen momentan unter den Physikern kontrovers diskutiert werden, es noch keine einheitliche „neue" Lehrmeinung gibt."* (L22F4) *„Danach würde ich auf den wissenschaftlichen Disput eingehen, da sonst die unterschiedlichen Aussagen für die Schule noch mehr ein Rätsel bleibt." (S8B1)*
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht sowohl die Pro- als auch die Anti-relativistische Masse-Perspektive dargestellt werden soll oder die Existenz verschiedener Perspektiven/Ansätze thematisiert werden soll, ohne auf die kontroverse Natur der Fragestellung/ Situation aufmerksam zu machen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HU7.3 codiert. Zum Beispiel: *„Es gibt unterschiedliche Betrachtungsweisen"* (L9F2) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Schüler*innen im Unterricht selbst zu der Problematik der Relativität der Masse diskutieren bzw. argumentieren sollen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HU8.1 codiert. Zum Beispiel: *„deswegen werden beide Sichtweisen in der kommenden Stunde diskutiert"* (S12B2)

	HU8. Diskutieren/Positionieren fördern
Name der Kategorie:	**HU8.1 $m(v)$ Diskutieren/Argumentationsfähigkeit fördern**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass die Schüler*innen im Unterricht selbst zu der Problematik der Relativität der Masse diskutieren bzw. argumentieren sollen.
theoretische Bezüge/Verortung:	Archila et al. 2020; Aufschnaiter & Prechtl 2018; Gebhard, Höttecke & Rehm 2017; Heitmann & Tiemann 2011; Kerr et al. 2015; Kraus 2008; Ohl 2013; Sieve & Schanze 2012; Stradling 1984; Wodzinski 2013
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass die Schüler*innen im Unterricht … (1) selbst zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse diskutieren oder (2) Argumente für/gegen die Relativität der Masse nutzen.
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„deswegen werden beide Sichtweisen in der kommenden Stunde diskutiert“* (S12B2) (2) *„Schüler sollen zu Argumentation in eine oder andere Richtung bewegt werden“* (L14F3)
weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn sich die Schüler*innen zusätzlich zur Diskussion der beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse oder der Nutzung von Argumenten für/gegen die Relativität der Masse explizit zu der Frage der Relativität der Masse positionieren sollen. ⇨ In diesem Fall werden die entsprechenden Abschnitte mit den Kategorien HU8.1 und HU8.2 codiert. Zum Beispiel: *„Im Anschluss sollen die SuS mit Argumenten begründet eine „präferierte“ Ansicht wählen.“* (S9B1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn lediglich ausgedrückt wird, dass im Unterricht sowohl die Pro- als auch die Anti-relativistische Masse-Perspektive dargestellt werden soll oder die Existenz verschiedener Perspektiven/Ansätze thematisiert werden soll, ohne diese Positionen selbst aktiv zu diskutieren. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HU7.3 codiert. Zum Beispiel: *„Vor- und Nachteile beider Sichtweisen herausarbeiten“* (S16B2) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass die Schüler*innen im Unterricht die Diskussion/den Konflikt zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse als Kontroverse kennen lernen sollen, jedoch ohne diese Positionen selbst aktiv zu diskutieren. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HU7.4 codiert. Zum Beispiel: *„Ich würde sagen, dass diese beiden gegenteiligen Meinungen momentan unter den Physikern kontrovers diskutiert werden, es noch keine einheitliche „neue“ Lehrmeinung gibt.“* (L22F4) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausschließlich ausgedrückt wird, dass sich die Schüler*innen im Unterricht selbst zu der Problematik der Relativität der Masse positionieren (eigene Meinung/Sichtweise) sollen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HU8.2 codiert. Zum Beispiel: *„Ich würde die Frage an die Klasse stellen wer sich welcher Meinung anschließt“* (S1B1)

Name der Kategorie:	**HU8. Diskutieren/Positionieren fördern** **HU8.2 Positionierung der Schüler*innen fördern**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass sich die Schüler*innen im Unterricht selbst zu der Problematik der Relativität der Masse positionieren sollen.
theoretische Bezüge/Verortung:	Oulton, Dillon & Grace 2004
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass sich die Schüler*innen im Unterricht selbst zu der Problematik der Relativität der Masse positionieren (eigene Meinung/Sichtweise) sollen.
Beispiele für Anwendungen:	*„Ich würde die Frage an die Klasse stellen wer sich welcher Meinung anschließt“* (S1B1) *„weitere Schüler Stellung nehmen lassen“* (L13F2)
weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn sich die Schüler*innen zusätzlich zur Diskussion der beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse oder der Nutzung von Argumenten für/gegen die Relativität der Masse explizit zu der Frage der Relativität der Masse positionieren sollen. ⇨ In diesem Fall werden die entsprechenden Abschnitte mit den Kategorien HU8.1 und HU8.2 codiert. Zum Beispiel: *„Im Anschluss sollen die SuS mit Argumenten begründet eine „präferierte“ Ansicht wählen.“* (S9B1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn leidglich ausgedrückt wird, dass die Schüler*innen im Unterricht selbst zu der Problematik der Relativität der Masse diskutieren bzw. argumentieren sollen, jedoch ohne sich dabei selbst explizit zu der Frage der Relativität der Masse zu positionieren. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HU8.1 codiert. Zum Beispiel: *„deswegen werden beide Sichtweisen in der kommenden Stunde diskutiert“* (S12B2)

Name der Kategorie:	**HU9. NoS-Aspekte thematisieren**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass im Unterricht Nature-of-Science-Aspekte thematisiert werden sollen.
theoretische Bezüge/Verortung:	Albe 2008; Dascal 2006; Kipnis 2001; Zeidler et al. 2005
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht Nature-of-Science-Aspekte thematisiert werden sollen, wie bspw.: (1) Vorläufigkeit naturwissenschaftlichen Wissens (2) Entwicklung des naturwissenschaftlichen Wissens (3) Möglichkeiten und Grenzen der Physik als Naturwissenschaft
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„Ich würde S3 zustimmen und sagen, dass die Physik eine Naturwissenschaft ist, aber die Erkenntnisse noch nicht abschließend feststehen müssen.“* (S11B1) (2) *„»Die Physik als Wissenschaft« entwickelt sich auch weiter“* (L12F2) (3) *„Es gibt in der Physik keine absoluten Beweise zur Begründung verschiedener Theorien. Man kann Theorien nur belegen.“* (S7B1)

Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Schüler*innen im Unterricht die Diskussion/den Konflikt zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse kennen lernen sollen, um auf die kontroverse Natur der Fragestellung/Situation aufmerksam zu machen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HU7.4 codiert. Zum Beispiel: *„Ich würde sagen, dass diese beiden gegenteiligen Meinungen momentan unter den Physikern kontrovers diskutiert werden, es noch keine einheitliche „neue“ Lehrmeinung gibt.“* (L22F4)

Nach dem Feedback (Vignette 3)

Name der Kategorie:	**HF1. Pro *m*(*v*) vertreten**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird eine Handlungsmöglichkeit formuliert, die Pro-relativistische Masse Position zu vermitteln.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn der Unterricht die Vermittlung einen der folgenden Aspekte beinhalten soll: (1) (bewegte/relativistische) Masse und Ruhemasse unterscheiden (2) Masse ist abhängig von der Geschwindigkeit eines Objektes bzw. vom Bezugssystem (Relativität der Masse, relativistische Masse) (3) die aktuell (im Schulkontext) verbreitete Position zur Relativität der Masse (z.B. Lehrplan, Lehrbücher)
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„noch mal klar unterscheiden, wann m=m(v) und m=m."* (S18B2) (2) *„im Vgl. von unterschiedlichen Bezugssystemen ist die Masse geschwindigkeitsabhängig"* (L38F6) (3) *„Ich würde bei der Lehrplanlinie bleiben"* (L20F3)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht sowohl die Pro- als auch die Anti-relativistische Masse-Perspektive dargestellt werden soll oder die Existenz verschiedener Perspektiven/Ansätze thematisiert werden soll. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HF4.3 codiert. Zum Beispiel: *„besteht das Ziel des Unterrichts darin, dass die SuS verschiedene Sichtweisen aufzeigen und erklären können"* (L21F4)

Name der Kategorie:	**HF2. Einheitlichkeit in der Schule**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass in der (jeweiligen) Schule eine einheitliche Vorgehensweise bei der Behandlung der Relativität der Masse im Unterricht herrschen sollte.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass in der (jeweiligen) Schule ein einheitliches Vorgehen der verschiedenen Lehrkräfte bei der Behandlung der Relativität der Masse im Unterricht bestehen sollte.
Beispiele für Anwendungen:	*„ein „einheitlicher" Standpunkt innerhalb der Fachschaft ist sicher begrüßenswert"* (L10F2) *„Die Schule sollte sich auf einen Weg im Kollegium einigen"* (S20B2)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn lediglich ausgedrückt wird, dass der/die Befragte sich mit Kollegen zu der Frage nach der Geschwindigkeits-abhängigkeit der Masse besprechen soll (Absprache, Beratung), ohne dabei explizit auf ein gleiches einheitliches Vorgehen im Unterricht abzuzielen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HF3 codiert. Zum Beispiel: *„Klärung in der Fachschaft Physik"* (L15F3)

Name der Kategorie:	**HF3. Besprechung mit Kollegen**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass eine Besprechung mit Kollegen (Physiklehrkräfte) stattfinden sollte.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass die Lehrkraft sich mit Kollegen zu der Frage nach der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse bespricht (Absprache, Beratung).
Beispiele für Anwendungen:	*„Klärung in der Fachschaft Physik“* (L15F3) *„Vor dem Elterngespräch würde ich mit dem Kollegen reden, um genau zu wissen, was er vermittelt hat“* (L30F5)

Name der Kategorie:	**HF4. *m*(*v*) als kontrovers behandeln** **HF4.1 Offenheit signalisieren**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass man als Lehrkraft offen bzw. unvoreingenomm-en gegenüber verschiedenen Standpunkten zur Geschwindigkeitsabhängig-keit der Masse ist.
theoretische Bezüge/Verortung:	Kerr et al. 2015; Hedtke 2002; Heitmann & Tiemann 2011; Niendorf & Reitz 2019
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterrichtskontext die verschiedenen Positionen Pro- oder Anti-relativistische Masse nicht aufgrund einer vorgefertigten eigenen Meinung als „richtig“ oder „falsch“ beurteilt werden, sondern Offenheit bzw. Toleranz in Bezug auf die verschiedenen Standpunkte besteht.
Beispiele für Anwendungen:	*„Keine der Sichtweisen ist jedoch falsch“* (S16B2) *„beide ihrer Jungs recht haben“* (S11B1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn im Unterricht zwar verschiedene Perspektiven zu der Frage nach der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse dargestellt werden sollen, allerdings ohne explizit Offenheit bzw. Toleranz in Bezug auf die verschiedenen Standpunkte auszudrücken, so dass nicht die Akzeptanz dieser Standpunkte im Vordergrund steht, sondern deren Vielfältigkeit. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HF4.3 codiert. Zum Beispiel: *„besteht das Ziel des Unterrichts darin, dass die SuS verschiedene Sichtweisen aufzeigen und erklären können“* (L21F4)

Name der Kategorie:	**HF4. *m*(*v*) als kontrovers behandeln** **HF4.2 Probleme eines Ansatzes thematisieren**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass Probleme in Bezug auf die beiden Ansätze Pro- bzw. Anti-relativistische Masse im Unterricht thematisiert werden sollen.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht eine Problematisierung (Schwächen/Nachteile) der Ansätze Pro- bzw. Anti-relativistische Masse stattfindet.
Beispiele für Anwendungen:	*„werde danach mich mit den Schülern über die Problematik verständigen“* (L15F3) *„erneute Physikstunde, wo auf diese Problematik hingewiesen wird“* (S8B1)

Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Schüler*innen im Unterricht die Diskussion/den Konflikt zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse kennen lernen sollen, um auf die kontroverse Natur der Fragestellung/Situation aufmerksam zu machen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HF4.4 codiert. Zum Beispiel: *„Wenn das Thema kontrovers (zur Zeit) diskutiert wird muß dies auch im Unterricht genannt werden.“* (L12F2)

	HF4. *m*(*v*) als kontrovers behandeln
Name der Kategorie:	**HF4.3 Multiperspektivität aufzeigen**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass im Unterricht verschiedene Perspektiven zu der Frage nach der Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse dargestellt werden sollen.
theoretische Bezüge/Verortung:	Cross & Price 1996; Hedtke 2002; Manzel 2017; Niendorf & Reitz 2019; Ohl 2013; Oulton, Dillon & Grace 2004
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht … (1) sowohl die Pro- als auch die Anti-relativistische Masse-Perspektive dargestellt werden soll, (2) die Existenz dieser verschiedenen Perspektiven/Ansätze thematisiert werden soll oder
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„besteht das Ziel des Unterrichts darin, dass die SuS verschiedene Sichtweisen aufzeigen und erklären können“* (L21F4) (2) *„Jeder Lehrer sollte in seinem Unterricht nicht nur <u>eine</u> Theorie vertreten, sondern auch auf den anderen Ansatz hinweisen bzw. nachträglich hinweisen.“* (L29F5)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Schüler*innen im Unterricht die Diskussion/den Konflikt zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse kennen lernen sollen, um auf die kontroverse Natur der Fragestellung/Situation aufmerksam zu machen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HF4.4 codiert. Zum Beispiel: *„Wenn das Thema kontrovers (zur Zeit) diskutiert wird muß dies auch im Unterricht genannt werden.“* (L12F2)

	HF4. *m*(*v*) als kontrovers behandeln
Name der Kategorie:	**HF4.4 Situation als Kontroverse thematisieren**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse als kontroverse Fragestellung/Situation dargestellt werden soll.
theoretische Bezüge/Verortung:	Kerr et al. 2015; Ohl 2013; Oulton, Dillon & Grace 2004
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn die Schüler*innen im Unterricht die Diskussion/den Konflikt zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse als Kontroverse kennen lernen sollen.
Beispiele für Anwendungen:	*„Wenn das Thema kontrovers (zur Zeit) diskutiert wird muß dies auch im Unterricht genannt werden.“* (L12F2)

Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht sowohl die Pro- als auch die Anti-relativistische Masse-Perspektive dargestellt werden soll oder die Existenz verschiedener Perspektiven/Ansätze thematisiert werden soll, ohne auf die kontroverse Natur der Fragestellung/ Situation aufmerksam zu machen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HF4.3 codiert. Zum Beispiel: *„besteht das Ziel des Unterrichts darin, dass die SuS verschiedene Sichtweisen aufzeigen und erklären können“* (L21F4) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Schüler*innen im Unterricht selbst zu der Problematik der Relativität der Masse diskutieren bzw. argumentieren sollen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HF5.1 codiert. Zum Beispiel: *„Planung einer Diskussion zwischen beiden Klassen/Sichtweisen“* (S6B1)

	HF5. Diskutieren/Positionieren fördern
Name der Kategorie:	**HF5.1 *m*(*v*) Diskutieren/Argumentationsfähigkeit fördern**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass die Schüler*innen im Unterricht selbst zu der Problematik der Relativität der Masse diskutieren bzw. argumentieren sollen.
theoretische Bezüge/Verortung:	Archila et al. 2020; Aufschnaiter & Prechtl 2018; Gebhard, Höttecke & Rehm 2017; Heitmann & Tiemann 2011; Kerr et al. 2015; Kraus 2008; Ohl 2013; Sieve & Schanze 2012; Stradling 1984; Wodzinski 2013
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass die Schüler*innen im Unterricht selbst zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse diskutieren sollen.
Beispiele für Anwendungen:	*„Planung einer Diskussion zwischen beiden Klassen/Sichtweisen“* (S6B1) *„die von mir in diesen Unterlagen vorgeschlagene Diskussion leiten“* (L27F4)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn lediglich ausgedrückt wird, dass im Unterricht sowohl die Pro- als auch die Anti-relativistische Masse-Perspektive dargestellt werden soll oder die Existenz verschiedener Perspektiven/Ansätze thematisiert werden soll, ohne diese Positionen selbst aktiv zu diskutieren. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HF4.3 codiert. Zum Beispiel: *„besteht das Ziel des Unterrichts darin, dass die SuS verschiedene Sichtweisen aufzeigen und erklären können“* (L21F4) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass die Schüler*innen im Unterricht die Diskussion/den Konflikt zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse als Kontroverse kennen lernen sollen, jedoch ohne diese Positionen selbst aktiv zu diskutieren. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HF4.4 codiert. Zum Beispiel: *„Wenn das Thema kontrovers (zur Zeit) diskutiert wird muß dies auch im Unterricht genannt werden.“* (L12F2)

	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass sich die Schüler*innen im Unterricht selbst zu der Problematik der Relativität der Masse positionieren (eigene Meinung/Sichtweise) sollen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HF5.2 codiert. Zum Beispiel: *„Wichtig ist, dass die Schüler die Grundlagen verstehen, gern dürfen sie sich ihre eigene Meinung bilden.“* (L33F5)

	HF5. Diskutieren/Positionieren fördern
Name der Kategorie:	**HF5.2 Positionierung der Schüler*innen fördern**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass sich die Schüler*innen im Unterricht selbst zu der Problematik der Relativität der Masse positionieren sollen.
theoretische Bezüge/Verortung:	Oulton, Dillon & Grace 2004
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass sich die Schüler*innen im Unterricht selbst zu der Problematik der Relativität der Masse positionieren (eigene Meinung/Sichtweise) sollen.
Beispiele für Anwendungen:	*„Wichtig ist, dass die Schüler die Grundlagen verstehen, gern dürfen sie sich ihre eigene Meinung bilden.“* (L33F5)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn leidglich ausgedrückt wird, dass die Schüler*innen im Unterricht selbst zu der Problematik der Relativität der Masse diskutieren bzw. argumentieren sollen, jedoch ohne sich dabei selbst explizit zu der Frage der Relativität der Masse zu positionieren. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HF5.1 codiert. Zum Beispiel: *„Planung einer Diskussion zwischen beiden Klassen/Sichtweisen“* (S6B1)

Name der Kategorie:	**HF6. NoS-Aspekte thematisieren**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass im Unterricht Nature-of-Science-Aspekte thematisiert werden sollen.
theoretische Bezüge/Verortung:	Albe 2008; Dascal 2006; Kipnis 2001; Zeidler et al. 2005
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass im Unterricht Nature-of-Science-Aspekte thematisiert werden sollen.
Beispiele für Anwendungen:	*„Im Physik-LK geht es meines Erachtens nicht nur um Stoffvermittlung, sondern auch um die Frage wie Erkenntnisse gewonnen werden.“* (L30F5)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Schüler*innen im Unterricht die Diskussion/den Konflikt zu den beiden Ansätzen Pro- bzw. Anti-relativistische Masse kennen lernen sollen, um auf die kontroverse Natur der Fragestellung/Situation aufmerksam zu machen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie HF4.4 codiert. Zum Beispiel: *„Wenn das Thema kontrovers (zur Zeit) diskutiert wird muß dies auch im Unterricht genannt werden.“* (L12F2)

Name der Kategorie:	**HF7. Leistungsbewertung (Benotung)**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird sich zur Leistungsbewertung (Benotung) geäußert.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn sich der/die Befragte zur Leistungs-bewertung (Benotung) z.B. in Klausuren oder dem Abitur äußert.
Beispiele für Anwendungen:	*„Machen sie sich keine Sorgen in Bezug auf die Leistungen in Klausuren oder dem Abitur, natürlich werden diese „Grenzfälle" der Wissenschaft berücksichtigt."* (S13B2) *„kein Nachteil für Schüler in der Prüfung"* (L23F4)

B.5 Codierleitfaden *NG*: *Nature-of-Science*-Vorstellungen (Gedankenlisten)

Name der Kategorie:	**NG1. Modelle**
inhaltliche Beschreibung:	Es werden Merkmale/Eigenschaften von Modellen bzw. die Arbeit mit Modellen allgemein thematisiert.
theoretische Bezüge/Verortung:	McComas & Olson 1998; Schulze Heuling, Mikelskis-Seifert & Nückles 2015
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn Merkmale/Eigenschaften von Modellen (auch Grenzen von Modellen) oder physikalischen Theorien bzw. die Arbeit mit Modellen allgemein thematisiert wird.
Beispiele für Anwendungen:	*„Ist nicht jede Theorie eine Art Modellvorstellung (vgl. Modellvorstellung Licht: Strahl, Welle, Teilchen), die hinsichtlich mancher Phänomene berechtigt ist, anderen Phänomenen gegenüber jedoch nicht?“* (S12B2)

Name der Kategorie:	**NG2. Rolle Mathematik**
inhaltliche Beschreibung:	Es werden Aspekte der Rolle der Mathematik in der Physik als Naturwissenschaft thematisiert.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn Aspekte der Rolle der Mathematik in der Physik als Naturwissenschaft thematisiert werden, z.B. die Verwendung von Gleichungen/Formeln als Beleg/Begründung/Beweis von Aussagen.
Beispiele für Anwendungen:	*„Grundaussagen ohne Begründung glaubt mir niemand → Gleichung?“* (L23F4) *„Masse unabhängig von Bezugssys. - Beweis Rechnungen (5) (6) (7)“* (S1B1)

Name der Kategorie:	**NG3. Rolle Experiment/Beobachtungen**
inhaltliche Beschreibung:	Es werden Aspekte der Rolle von Experimenten oder Beobachtungen in der Physik als Naturwissenschaft thematisiert.
theoretische Bezüge/Verortung:	Höttecke 2010; Höttecke & Rieß 2007; Lederman 2007; McComas & Olson 1998; Osborne et al. 2003; Schulze Heuling, Mikelskis-Seifert & Nückles 2015
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn Aspekte der Rolle von Experimenten oder Beobachtungen in der Physik als Naturwissenschaft thematisiert werden, insbesondere die Bedeutung des Experiments zur empirischen Fundierung wissenschaftlicher Erkenntnisse/Theorien (Nachweis).
Beispiele für Anwendungen:	*„Wie will man diese Theorie komplett ablehnen, wenn sie doch für viele Beobachtungen konsistent ist?“* (S12B2) *„Experimente mit Licht zeigen aber, dass sie sich verhalten, als hätten sie eine Masse (Lichtblitz auf Spiegel → Auslenkung)“* (L18F3)
Weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn ausgedrückt wird, dass Experimente wissenschaftliches Wissen beweisen können bzw. sicheres Wissen erzeugen. Dabei wird zusätzlich Kategorie NG8 codiert. Zum Beispiel: *„Ist das nicht experimentell gesichert?“* (L26F4) Die Kategorie wird auch codiert, wenn zusätzlich zu Aspekten der Rolle von Experimenten oder Beobachtungen in der Physik als Naturwissenschaft die Möglichkeit unterschiedlicher Interpretationen von Experimenten (deren Ergebnissen) durch Wissenschaftler*innen thematisiert wird.

	⇨ In diesem Fall werden die beiden Kategorien NG3 und NG4 codiert. Zum Beispiel: *„Experimente zeigen nur: p nicht linear abhängig von v → Interpretation von m_r oder Nachweis für γ, γm=m_r=m_{bewegt}“* (S8B1)

Name der Kategorie:	**NG4. Subjektivität/Interpretation**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird die Subjektivität wissenschaftlichen Wissens thematisiert.
theoretische Bezüge/Verortung:	Höttecke & Rieß 2007; Lederman 2007; Osborne et al. 2003
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn die Subjektivität wissenschaftlichen Wissens, insbesondere die Möglichkeit unterschiedlicher Interpretationen des gleichen Sachverhalts (z.B. Interpretationsprozess bei der Analyse von Daten/Gleichungen) durch Wissenschaftler*innen thematisiert wird.
Beispiele für Anwendungen:	*„Es sind offensichtlich viele Deutungen bzgl. der Experimente möglich“* (L29F5) *„So kann ein Exp. als Nachweis für relative Masse interpretiert werden oder aber für den Nachweis eines Faktors.“* (S1B1)
Weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn zusätzlich zu Aspekten der Rolle von Experimenten oder Beobachtungen in der Physik als Naturwissenschaft die Möglichkeit unterschiedlicher Interpretationen von Experimenten (deren Ergebnissen) durch Wissenschaftler*innen thematisiert wird. ⇨ In diesem Fall werden die beiden Kategorien NG3 und NG4 codiert. Zum Beispiel: *„Experimente zeigen nur: p nicht linear abhängig von v → Interpretation von m_r oder Nachweis für γ, γm=m_r=m_{bewegt}“* (S8B1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn das Vorkommen unterschiedlicher Fachmeinungen zu einem physikalischen Sachverhalt thematisiert wird, ohne dabei auszudrücken, dass diese Fachmeinungen auf unterschiedlichen (subjektiven) Interpretationen des Sachverhalts durch unterschiedliche Wissenschaftler*innen beruhen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie NG5.1 codiert. Zum Beispiel: *„Berechtigung beider Ansätze“* (S12B2)

Name der Kategorie:	**NG5. Kontroversität** **NG5.1 Meinungsvielfalt**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird das Vorkommen unterschiedlicher Fachmeinungen zu einem physikalischen Sachverhalt als Aspekt von Kontroversität in der Wissenschaft thematisiert.
theoretische Bezüge/Verortung:	Höttecke 2010; Höttecke & Rieß 2007; Schindler, Lehnen & Jakobs 2006; Schulze Heuling, Mikelskis-Seifert & Nückles 2015
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn das Vorkommen unterschiedlicher Fachmeinungen zu einem physikalischen Sachverhalt (als „schwacher Aspekt“ von Kontroversität in der Wissenschaft) thematisiert wird.
Beispiele für Anwendungen:	*„Woher kommen diese versch. Sichtweisen“* (S6B1) *„Berechtigung beider Ansätze“* (S12B2)

Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn lediglich ausgedrückt wird, dass die beiden verschieden Ansätze Pro- bzw. Anti-relativistische-Masse im Unterricht behandelt werden können (Frage der Umsetzung im Unterricht). ⇨ In diesem Fall wird keine NoS-Codierung vorgenommen. Zum Beispiel: *„die Ansätze über relativistische und nicht-relativistische Masse kurz umreißen“* (L27F4) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass unterschiedliche Fachmeinungen auf unterschiedlichen (subjektiven) Interpretationen eines physikalischen Sachverhalts durch unterschiedliche Wissenschaftler*innen beruhen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie NG4 codiert. Zum Beispiel: *„So kann ein Exp. als Nachweis für relative Masse interpretiert werden oder aber für den Nachweis eines Faktors.“* (S1B1) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn nicht nur das Vorkommen unterschiedlicher Fachmeinungen zu einem physikalischen Sachverhalt, sondern auch die kontroverse Auseinandersetzung dieser Fachmeinungen im Sinne eines Diskurses, eines Aushandlungsprozesses, thematisiert wird. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie NG5.2 codiert. Zum Beispiel: *„Fazit aus den letzten Texten: große Meinungsverschiedenheit über relativistische Masse“* (S10B1)

	NG5. Kontroversität
Name der Kategorie:	**NG5.2 Kontroversen/Diskurse**
inhaltliche Beschreibung:	Es werden Kontroversen oder Diskurse in der Wissenschaft/unter Wissenschaftler*innen thematisiert.
theoretische Bezüge/Verortung:	Höttecke 2010; Höttecke & Rieß 2007; Schindler, Lehnen & Jakobs 2006; Schulze Heuling, Mikelskis-Seifert & Nückles 2015
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn Kontroversen oder Diskurse in der Wissenschaft/unter Wissenschaftler*innen (Uneinigkeit) im Sinne eines Aushandlungsprozesses (Kontroversität) wissenschaftlicher Erkenntnisse thematisiert werden.
Beispiele für Anwendungen:	*„Offensichtlich ist der Diskurs hier noch nicht abgeschlossen.“* (S9B1) *„Fazit aus den letzten Texten: große Meinungsverschiedenheit über relativistische Masse“* (S10B1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn lediglich ausgedrückt wird, dass die beiden verschieden Ansätze Pro- bzw. Anti-relativistische-Masse im Unterricht diskutiert werden können (Frage der Umsetzung im Unterricht). ⇨ In diesem Fall wird keine NoS-Codierung vorgenommen. Zum Beispiel: *„Beide Ansätze im Unterricht zu diskutieren finde ich spannend“* (L29F5) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn lediglich das Vorkommen unterschiedlicher Fachmeinungen zu einem physikalischen Sachverhalt, ohne die kontroverse Auseinandersetzung dieser Fachmeinungen im Sinne eines Diskurses, eines Aushandlungsprozesses, thematisiert wird. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie NG5.1 codiert. Zum Beispiel: *„Berechtigung beider Ansätze“* (S12B2)

Name der Kategorie:	**NG6. kein richtig/falsch**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass eine eindeutige Differenzierung in „richtig“ und „falsch“ in (einem Bereich) der Physik als Naturwissenschaft nicht angewendet werden kann.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn geäußert wird, dass es kein „richtig“ und „falsch“ gibt.
Beispiele für Anwendungen:	*„gibt es wohl vorerst kein wahr oder falsch sondern nur »und«“* (S12B1) *„Das scheint ein tolles Thema für Dinge ohne richtig & falsch zu sein“* (L21F4)

Name der Kategorie:	**NG7. Wissen ist dynamisch** **NG7.1 Vorläufigkeit**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird die Vorläufigkeit wissenschaftlichen Wissens/Erkenntnisse thematisiert.
theoretische Bezüge/Verortung:	Höttecke 2010; Höttecke & Rieß 2007; Lederman 2007; McComas & Olson 1998; Osborne et al. 2003
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn die Vorläufigkeit naturwissenschaft-lichen Wissens thematisiert wird, z.B. dass physikalische Begriffe/Sachverhalte nicht absolut sicher feststehen oder überholt seien.
Beispiele für Anwendungen:	*„es scheint, dass alles was man über die SRT in der Schule gelernt hat in gewisser Hinsicht verworfen werden muss“* (S12B2) *„der den SuS klar machen das es falsch/überholt ist“* (S1B1)

Name der Kategorie:	**NG7. Wissen ist dynamisch** **NG7.2 Entwicklung**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird die Entwicklung wissenschaftlichen Wissens/Erkenntnisse thematisiert.
theoretische Bezüge/Verortung:	Höttecke 2010; McComas & Olson 1998; Osborne et al. 2003
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn die Entwicklung naturwissenschaft-lichen Wissens, bspw.: (1) naturwiss. Wissen entwickelt sich (weiter) (2) neue/aktuelle Erkenntnisse (3) Forschung/weitere Erforschung (4) Wissenschaft als dynamischer Prozess thematisiert wird.
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„gerade Widersprüche können Entwicklungen/Entdeckungen antreiben“* (L13F2) (2) *„neue Erkenntnisse sollen Einfluss haben“* (S11B1) (3) *„die aktuelle Forschung dahingehend noch nicht abgeschlossen ist“* (S1B1) (4) *„Naturwissenschaften sind ein dynamischer Prozess, sie entwickeln sich“* (L10F2)

Name der Kategorie:	**NG8. Wissen ist eindeutig/sicher**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass wissenschaftliches Wissens oder Erkenntnisse eindeutig festgelegt bzw. sicher seien.
theoretische Bezüge/Verortung:	Höttecke & Hopf 2018; Lederman 2007
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass wissenschaftliches Wissens oder Erkenntnisse … (1) eindeutig festgelegt („richtig“/„falsch“ existieren objektiv) bzw. (2) (irgendwann) sicher/abgeschlossen (also nicht vorläufig) seien.
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„Dennoch sollte mindestens der richtige, wissenschaftliche Zusammenhang in der Schule erwähnt werden.“* (S13B2) (2) *„das es an diesem Punkt noch keine endgültige Entscheidung über richtig und falsch gibt“* (S1B1)
Weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn ausgedrückt wird, dass Experimente oder mathematische Gleichungen/Formeln wissenschaftliches Wissen beweisen können bzw. sicheres Wissen erzeugen. Dabei wird zusätzlich Kategorie NG3 oder NG2 codiert. Zum Beispiel: *„Ist das nicht experimentell gesichert?“* (L26F4)

Name der Kategorie:	**NG9. Skeptizismus/kritische Haltung**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird Skeptizismus bzw. eine kritische Haltung im Sinne einer Grundeinstellung für wissenschaftliches Arbeiten thematisiert.
theoretische Bezüge/Verortung:	McComas & Olson 1998; Osborne et al. 2003
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn die kritische Auseinandersetzung mit einem Sachverhalt bzw. kritisches Hinterfragen thematisiert wird.
Beispiele für Anwendungen:	*„Es ist also wichtig, Ergebnisse von Experimenten kritisch zu hinterfragen“* (S9B1) *„meiner Meinung nach sollte die Gleichung auch kritisch im Unterricht beleuchtet werden; man sollte sie nicht einfach als gegeben hinnehmen“* (S16B2)

Name der Kategorie:	**NG10. Korrespondenzprinzip/Konsistenz verschiedener Theorien**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird das Korrespondenzprinzip bzw. die Konsistenz verschiedener physikalischer Theorien untereinander thematisiert.
theoretische Bezüge/Verortung:	Höttecke & Rieß 2007; McComas & Olson 1998
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn … (1) das Korrespondenzprinzip zwischen der Speziellen Relativitätstheorie und der Newtonschen Physik oder (2) die Konsistenz (Vereinbarkeit) von Erkenntnissen vor dem Hintergrund unterschiedlicher physikalischer Theorien thematisiert wird.

Beispiele für Anwendungen:	(1) *„Ziel der SRT ist es, in den Maßstäben der klass. Mechanik wiederspruchsfrei zu sein, d.h. eher Grenzfall kleiner Geschwindigkeiten"* (S20B2) (2) *„Die Unterscheidung zwischen Ruhemasse und bewegter Masse ist meines Erachtens richtig auch hinsichtlich der Quantenphysik die später behandelt wird."* (L30F5)

Name der Kategorie:	**NG11. Einfluss außerwissenschaftlicher Faktoren**
inhaltliche Beschreibung:	Es werden (vermutete) politische bzw. ideologische Einflüsse auf wissenschaftliches Wissen thematisiert.
theoretische Bezüge/Verortung:	Höttecke & Hopf 2018; Lederman 2007
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn der Einfluss von Politik oder Ideologien auf wissenschaftliche Erkenntnisse/Wissen thematisiert wird.
Beispiele für Anwendungen:	*„Die Gründe für eine Negierung der relativist. Masse können vielfach sein: wissenschaftlicher (Kobel) oder ideologischer (türk. Lehrplan) Natur."* (L26F4) *„? ideologiebeladene Masse"* (L36F5)

B.6 Codierleitfaden *NV Nature-of-Science*-Aspekte im Unterrichtskontext (Vignetten)

Name der Kategorie:	**NV1. Modelle**
inhaltliche Beschreibung:	Es werden Merkmale/Eigenschaften von Modellen bzw. die Arbeit mit Modellen allgemein thematisiert.
theoretische Bezüge/Verortung:	McComas & Olson 1998; Schulze Heuling, Mikelskis-Seifert & Nückles 2015
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn Merkmale/Eigenschaften von Modellen (auch Grenzen von Modellen → siehe: weitere Anwendungen) oder physikalischen Theorien bzw. die Arbeit mit Modellen allgemein thematisiert wird.
Beispiele für Anwendungen:	*„eine Begründung durch ein „passendes" Modell."* (L33F5) *„Eine Naturwissenschaft arbeitet mit Modellen (auch math. Natur)"* (L2F1)
Weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn Grenzen von Modellen oder physikalischen Theorien bei der Beschreibung physikalischer Phänomene (z.B. beschränkter Gültigkeitsbereich) thematisiert werden. Zum Beispiel: *„klassische Denkweisen führen bei sehr hohen Geschwindigkeiten nicht zur widerspruchsfreien Lösung"* (L18F2)

Name der Kategorie:	**NV2. Rolle Mathematik**
inhaltliche Beschreibung:	Es werden Aspekte der Rolle der Mathematik in der Physik als Naturwissenschaft thematisiert.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn Aspekte der Rolle der Mathematik in der Physik als Naturwissenschaft thematisiert werden, z.B. die Verwendung von Gleichungen/Formeln als Beleg/Begründung von Aussagen.
Beispiele für Anwendungen:	*„Anhand der Gleichungen lassen sich experimentelle Erkenntnisse bestätigen (z.B. Teilchenbeschleuniger)"* (L2F1) *„$m=\gamma m_0$ - lässt sich aus den Postulaten herleiten"* (L19F3)

Name der Kategorie:	**NV3. Rolle Experiment/Beobachtungen**
inhaltliche Beschreibung:	Es werden Aspekte der Rolle von Experimenten oder Beobachtungen in der Physik als Naturwissenschaft thematisiert.
theoretische Bezüge/Verortung:	Höttecke 2010; Höttecke & Rieß 2007; Lederman 2007; McComas & Olson 1998; Osborne et al. 2003; Schulze Heuling, Mikelskis-Seifert & Nückles 2015
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn Aspekte der Rolle von Experimenten oder Beobachtungen in der Physik als Naturwissenschaft thematisiert werden, insbesondere die Bedeutung des Experiments zur empirischen Fundierung wissenschaftlicher Erkenntnisse/Theorien (Nachweis).
Beispiele für Anwendungen:	*„Nachweis über Experimente nötig, um eine Theorie zu stützen"* (L2F1) *„durch Experimente bzw. Beobachtungen ihre Theorien bestätigen muss"* (L37F5)

Name der Kategorie:	**NV4. Subjektivität/Interpretation**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird die Subjektivität wissenschaftlichen Wissens thematisiert.
theoretische Bezüge/Verortung:	Höttecke & Rieß 2007; Lederman 2007; Osborne et al. 2003
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn die Subjektivität wissenschaftlichen Wissens, insbesondere die Möglichkeit unterschiedlicher Interpretationen des gleichen Sachverhalts (z.B. Interpretationsprozess bei der Analyse von Daten/Gleichungen) durch Wissenschaftler*innen thematisiert wird.
Beispiele für Anwendungen:	*„Letztlich geht es um die Interpretation des Produktes $\gamma \cdot m_0$ als Masse. Je nach dem nimmt die Masse zu oder eben nur γ.“* (L26F4) *„mehrere Interpretationen möglich“* (L23F4)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn das Vorkommen unterschiedlicher Fachmeinungen zu einem physikalischen Sachverhalt thematisiert wird, ohne dabei auszudrücken, dass diese Fachmeinungen auf unterschiedlichen (subjektiven) Interpretationen des Sachverhalts durch unterschiedliche Wissenschaftler*innen beruhen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie NV5.1 codiert. Zum Beispiel: *„in Bezug auf die „Massen-Problematik“ gibt es nun einmal 2 unterschiedliche Standpunkte.“* (S22B2)

Name der Kategorie:	**NV5. Kontroversität** **NV5.1 Meinungsvielfalt**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird das Vorkommen unterschiedlicher Fachmeinungen zu einem physikalischen Sachverhalt als Aspekt von Kontroversität in der Wissenschaft thematisiert.
theoretische Bezüge/Verortung:	Höttecke 2010; Höttecke & Rieß 2007; Schindler, Lehnen & Jakobs 2006; Schulze Heuling, Mikelskis-Seifert & Nückles 2015
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn das Vorkommen unterschiedlicher Fachmeinungen zu einem physikalischen Sachverhalt (als „schwacher Aspekt“ von Kontroversität in der Wissenschaft) thematisiert wird.
Beispiele für Anwendungen:	*„beide Meinungen zur Zeit in der Wissenschaft vertreten“* (L2F1) *„in Bezug auf die „Massen-Problematik“ gibt es nun einmal 2 unterschiedliche Standpunkte.“* (S22B2)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn lediglich ausgedrückt wird, dass die beiden verschieden Ansätze Pro- bzw. Anti-relativistische-Masse im Unterricht behandelt werden können (Frage der Umsetzung im Unterricht). ⇨ In diesem Fall wird keine NoS-Codierung vorgenommen. Zum Beispiel: *„widersprüchl. Aussagen in Fachbüchern sind kein Problem → im Gegenteil - beide Varianten können besprochen werden“* (L23F4) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass unterschiedliche <u>Lehr</u>meinungen (Frage der Umsetzung im Unterricht) zu einer physikalischen Frage bestehen. ⇨ In diesem Fall wird keine NoS-Codierung vorgenommen. Zum Beispiel: *„es unterschiedl. Lehrermeinungen gibt.“* (L5F1)

	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass unterschiedliche Fachmeinungen auf unterschiedlichen (subjektiven) Interpretationen eines physikalischen Sachverhalts durch unterschiedliche Wissenschaftler*innen beruhen. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie NV4 codiert. Zum Beispiel: *„Letztlich geht es um die Interpretation des Produktes $\gamma \cdot m_0$ als Masse. Je nach dem nimmt die Masse zu oder eben nur γ.“* (L26F4) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn nicht nur das Vorkommen unterschiedlicher Fachmeinungen zu einem physikalischen Sachverhalt, sondern auch die kontroverse Auseinandersetzung dieser Fachmeinungen im Sinne eines Diskurses, eines Aushandlungsprozesses, thematisiert wird. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie NV5.2 codiert. Zum Beispiel: *„Fragestellung der bewegten Masse ist in der Physik umstritten. Einige Physiker befürworten sie, während andere sie strikt ablehnen.“* (S16B2)

	NV5. Kontroversität
Name der Kategorie:	**NV5.2 Kontroversen/Diskurse**
inhaltliche Beschreibung:	Es werden Kontroversen oder Diskurse in der Wissenschaft/unter Wissenschaftler*innen thematisiert.
theoretische Bezüge/Verortung:	Höttecke 2010; Höttecke & Rieß 2007; Schindler, Lehnen & Jakobs 2006; Schulze Heuling, Mikelskis-Seifert & Nückles 2015
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn Kontroversen oder Diskurse in der Wissenschaft/unter Wissenschaftler*innen (Uneinigkeit) im Sinne eines Aushandlungsprozesses (Kontroversität) wissenschaftlicher Erkenntnisse thematisiert werden.
Beispiele für Anwendungen:	*„Ich würde sagen, dass diese beiden gegenteiligen Meinungen momentan unter den Physikern kontrovers diskutiert werden, es noch keine einheitliche „neue“ Lehrmeinung gibt.“* (L22F4) *„Fragestellung der bewegten Masse ist in der Physik umstritten. Einige Physiker befürworten sie, während andere sie strikt ablehnen.“* (S16B2)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn lediglich ausgedrückt wird, dass die beiden verschieden Ansätze Pro- bzw. Anti-relativistische-Masse im Unterricht diskutiert werden können (Frage der Umsetzung im Unterricht). ⇨ In diesem Fall wird keine NoS-Codierung vorgenommen. Zum Beispiel: *„Diskussion über beide Sichtweisen + Stellungnahme durch SuS/Lehrkraft“* (S6B1) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn lediglich das Vorkommen unterschiedlicher Fachmeinungen zu einem physikalischen Sachverhalt, ohne die kontroverse Auseinandersetzung dieser Fachmeinungen im Sinne eines Diskurses, eines Aushandlungsprozesses, thematisiert wird. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie NV5.1 codiert. Zum Beispiel: *„in Bezug auf die „Massen-Problematik“ gibt es nun einmal 2 unterschiedliche Standpunkte.“* (S22B2)

Name der Kategorie:	**NV6. kein richtig/falsch**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass eine eindeutige Differenzierung in „richtig“ und „falsch“ in (einem Bereich) der Physik als Naturwissenschaft nicht angewendet werden kann.
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn geäußert wird, dass es kein „richtig“ und „falsch“ gibt.
Beispiele für Anwendungen:	*„In einer NW gibt es kein absolutes RICHTIG oder FALSCH!“* (L37F5) *„es gibt kein »richtig« und kein »falsch«“* (S22B2)
Weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn geäußert wird, dass es kein „falsch“ gibt. Zum Beispiel: *„Keine der Sichtweisen ist jedoch falsch“* (S16B2)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Unmöglichkeit, in „richtig“ und „falsch“ zu unterscheiden, als Merkmale/Eigenschaften von Modellen oder physikalischen Theorien thematisiert wird. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie NV1 codiert. Zum Beispiel: *„Bei Modellen gibt es kein richtig ↔ falsch.“* (L3F1) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Unmöglichkeit, in „richtig“ und „falsch“ zu unterscheiden, als Defizit betrachtet wird. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie NV8 codiert. Zum Beispiel: *„Es ist durchaus kritisch zu sehen, wenn Dinge nicht klar als richtig oder falsch angesehen werden.“* (S21B2)

Name der Kategorie:	**NV7. Wissen ist dynamisch** **NV7.1 Vorläufigkeit**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird die Vorläufigkeit wissenschaftlichen Wissens/Erkenntnisse thematisiert.
theoretische Bezüge/Verortung:	Höttecke 2010; Höttecke & Rieß 2007; Lederman 2007; McComas & Olson 1998; Osborne et al. 2003
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn die Vorläufigkeit naturwissenschaftlichen Wissens, bspw.: (1) naturwiss. Wissen ist nicht sicher/feststehend (2) naturwiss. Wissen ist nicht abschließend geklärt (3) naturwiss. Wissen ist nicht absolut thematisiert wird.
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„in d. modernen Physik sind nicht alle Erkenntnisse sicher“* (L2F1) (2) *„auch in der Physik ist nicht alles abschließend geklärt“* (S22B2) (3) *„in den Naturwissenschaften noch nichts als „unverrückbar“ und absolut angesehen werden kann.“* (S13B2)

Name der Kategorie:	**NV7. Wissen ist dynamisch** **NV7.2 Entwicklung**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird die Entwicklung wissenschaftlichen Wissens/Erkenntnisse thematisiert.
theoretische Bezüge/Verortung:	Höttecke 2010; McComas & Olson 1998; Osborne et al. 2003
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn die Entwicklung naturwissenschaftlichen Wissens, bspw.: (1) naturwiss. Wissen entwickelt sich (weiter) (2) neue/aktuelle Erkenntnisse (3) Forschung/weitere Erforschung (4) Wissenschaft als dynamischer Prozess thematisiert wird.
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„darauf verwiesen werden, dass sich bestimmte Erkenntnisse entwickeln“* (L10F2) (2) *„Es ist möglich, dass die Wissenschaft dazu neue Erkenntnisse hervorbringt“* (L33F5) (3) *„Jedoch zeigt dies ja auch nur wie aktuell die Thematik in der Forschung ist.“* (S1B1) (4) *„Letztendlich ist die Wissenschaft doch immer einer gewissen Dynamik unterworfen“* (S22B2)
Weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn ausgedrückt wird, dass der Aussage von S3 in Vignette 2B zugestimmt wird. Dabei wird zusätzlich Kategorie NV8 codiert. Zum Beispiel: *„S3 – würde ich Recht geben“* (L5F1)
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn ausgedrückt wird, dass wissenschaftliches Wissens oder Erkenntnisse irgendwann in der Zukunft eindeutig festgelegt, sicher oder abgeschlossen sein werden. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie NV8 codiert. Zum Beispiel: *„exakte/korrekte Erklärung noch nicht endgültig gefunden hat.“* (S2B1)

Name der Kategorie:	**NV8. Wissen ist eindeutig/sicher**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird ausgedrückt, dass wissenschaftliches Wissens oder Erkenntnisse eindeutig festgelegt bzw. sicher seien.
theoretische Bezüge/Verortung:	Höttecke & Hopf 2018; Lederman 2007
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn ausgedrückt wird, dass wissenschaftliches Wissens oder Erkenntnisse … (1) eindeutig festgelegt („richtig“/„falsch“ existieren objektiv) bzw. (2) (irgendwann) sicher/abgeschlossen (also nicht vorläufig) seien.
Beispiele für Anwendungen:	(1) *„zum entsprechenden Zeitpunkt als „richtig“ bewiesen werden können“* (L10F2) (2) *„Eine endgültige Antwort gibt es dafür noch nicht“* (S11B1)
Weitere Anwendungen:	Die Kategorie wird auch codiert, wenn ausgedrückt wird, dass der Aussage von S3 in Vignette 2B zugestimmt wird. Dabei wird zusätzlich Kategorie NV7.2 codiert. Zum Beispiel: *„S3 – würde ich Recht geben“* (L5F1)

Name der Kategorie:	**NV9. Skeptizismus/kritische Haltung**
inhaltliche Beschreibung:	Es wird Skeptizismus bzw. eine kritische Haltung im Sinne einer Grundeinstellung für wissenschaftliches Arbeiten thematisiert.
theoretische Bezüge/Verortung:	McComas & Olson 1998; Osborne et al. 2003
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn die kritische Auseinandersetzung mit einem Sachverhalt bzw. kritisches Hinterfragen gefördert oder thematisiert wird.
Beispiele für Anwendungen:	*„ihnen so die Möglichkeit bieten, sich kritisch mit einem wissenschaftl. Inhalt auseinanderzusetzen."* (S9B1) *„du Autoritäten [UNLESERLICH] durch kritische Auseinandersetzung durchaus in Frage gestellt werden kann und im Kantschen Sinne Aufklärung durch »Anstrengung des eigenen Geistes« und »eigenes Urteil« notwendig ist"* (L14F3)

Name der Kategorie:	**NV10. Grenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnisse**
inhaltliche Beschreibung:	Es werden Grenzen wissenschaftlicher Erkenntnisse oder Erkenntnisgewinnung thematisiert.
theoretische Bezüge/Verortung:	Korte 2015; McComas & Olson 1998
Anwendung der Kategorie:	Diese Kategorie wird codiert, wenn Grenzen wissenschaftlicher Erkenntnisse oder Erkenntnisgewinnung bzw. naturwissenschaftlicher Forschung thematisiert werden.
Beispiele für Anwendungen:	*„Es gibt in der Physik keine absoluten Beweise zur Begründung verschiedener Theorien. Man kann Theorien nur belegen."* (S7B1) *„werden auf Probleme losgeschickt, die nicht einmal Wissenschaftler klar lösen können" (S12B2)*
Abgrenzung zu anderen Kategorien:	Die Kategorie wird nicht codiert, wenn Grenzen von Modellen oder physikalischen Theorien bei der Beschreibung physikalischer Phänomene (z.B. beschränkter Gültigkeitsbereich) thematisiert werden. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie NV1 codiert. Zum Beispiel: *„klassische Denkweisen führen bei sehr hohen Geschwindigkeiten nicht zur widerspruchsfreien Lösung"* (L18F2) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn naturwissenschaftliches Wissen als nicht sicher/feststehend, nicht abschließend geklärt oder nicht absolut betrachtet wird. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie NV7.1 codiert. Zum Beispiel: *„in d. modernen Physik sind nicht alle Erkenntnisse sicher"* (L2F1) Die Kategorie wird nicht codiert, wenn die Entwicklung naturwissenschaft-lichen Wissens (z.B. auch: neue Erkenntnisse, weitere Erforschung) thematisiert wird. ⇨ In diesem Fall wird Kategorie NV7.2 codiert. Zum Beispiel: *„Auch hier würde ich darauf hinweisen, dass dies nicht abschließend erforscht ist, sodass die Theorie der relativistischen Masse nicht gänzlich verworfen werden kann."* (S21B2)

C Intercoder-Übereinstimmung

C.1 Intercoder-Übereinstimmung für das Kategoriensystem *G*

Tabelle C.1: Werte der Intercoder-Übereinstimmung für das Vorhandensein der Kategorien

Kategorie	**Übereinstimmungen**	**Nicht-Übereinstimmungen**	**prozentuale Übereinstimmung**
G1.1	3	4	42,86
G1.2	13	1	92,86
G2.1	7	2	77,78
G2.2	7	1	87,50
G3	2	3	40,00
G4.1	1	7	12,50
G4.2	13	3	81,25
G4.3	5	4	55,56
G4.4	8	7	53,33
G5.1	15	3	83,33
G5.2	10	6	62,50
G5.3	10	2	83,33
G5.4	3	5	37,50
G6.1	8	2	80,00
G6.2	4	3	57,14
G6.3	1	0	100,00
G6.4.1	7	2	77,78
G6.4.2	1	1	50,00
G6.5.1	8	2	80,00
G6.5.2	3	1	75,00
G7.1	8	1	88,89
G7.2	2	2	50,00
G7.3	3	1	75,00
G7.4	4	5	44,44
G7.5	6	3	66,67
Gesamt	152	71	68,16

Tabelle C.2: Werte der Intercoder-Übereinstimmung auf Segment-Ebene bei 25%-Codeüberlappung

Kategorie	Übereinstimmungen	Nicht-Übereinstimmungen	prozentuale Übereinstimmung
G7.5	23	3	88,46
G7.4	12	13	48,00
G7.3	6	4	60,00
G7.2	7	2	77,78
G7.1	18	9	66,67
G6.5.2	6	3	66,67
G6.5.1	25	19	56,82
G6.4.2	2	1	66,67
G6.4.1	15	5	75,00
G6.3	2	8	20,00
G6.2	8	10	44,44
G6.1	23	17	57,50
G5.4	4	8	33,33
G5.3	32	17	65,31
G5.2	24	22	52,17
G5.1	42	11	79,25
G4.4	20	19	51,28
G4.3	18	8	69,23
G4.2	42	24	63,64
G4.1	0	9	0,00
G3	2	8	20,00
G3.1	0	1	0,00
G2.2	20	10	66,67
G2.1	14	5	73,68
G1.2	42	30	58,33
G1.1	4	18	18,18
Gesamt	411	283	59,22

Tabelle C.3: Werte der Intercoder-Übereinstimmung auf Segment-Ebene bei 75%-Codeüberlappung

Kategorie	Übereinstimmungen	Nicht-Übereinstimmungen	prozentuale Übereinstimmung
G7.5	16	10	61,54
G7.4	10	15	40,00
G7.3	2	8	20,00
G7.2	4	5	44,44
G7.1	8	19	29,63
G6.5.2	4	5	44,44
G6.5.1	14	30	31,82
G6.4.2	2	1	66,67
G6.4.1	10	10	50,00
G6.3	2	8	20,00
G6.2	6	12	33,33
G6.1	20	20	50,00
G5.4	2	10	16,67
G5.3	26	23	53,06
G5.2	18	28	39,13
G5.1	34	19	64,15
G4.4	16	23	41,03
G4.3	18	8	69,23
G4.2	30	36	45,45
G4.1	0	9	0,00
G3	2	8	20,00
G2.2	14	16	46,67
G2.1	12	7	63,16
G1.2	24	48	33,33
G1.1	4	18	18,18
Gesamt	298	396	42,94

C.2 Intercoder-Übereinstimmung für das Kategoriensystem *B*

Tabelle C.4: Werte der Intercoder-Übereinstimmung für das Vorhandensein der Kategorien

Kategorie	Übereinstim-mungen	Nicht-Übereinstim-mungen	prozentuale Übereinstim-mung
B1.1	4	5	44,44
B1.2	4	2	66,67
B1.3	1	4	20,00
B2	10	4	71,43
B3.1	3	5	37,50
B3.2	5	3	62,50
B3.3	7	1	87,50
B4.1	8	4	66,67
B4.2	8	1	88,89
B4.3	2	4	33,33
B4.4	1	2	33,33
B4.5	5	3	62,50
B5.1	3	3	50,00
B5.2	1	2	33,33
B5.3	1	1	50,00
Gesamt	63	44	58,88

Tabelle C.5: Werte der Intercoder-Übereinstimmung auf Segment-Ebene bei 25%-Codeüberlappung

Kategorie	Übereinstimmungen	Nicht-Übereinstimmungen	prozentuale Übereinstimmung
B5.3	2	1	66,67
B5.2	2	4	33,33
B5.1	6	3	66,67
B4.5	12	3	80,00
B4.4	2	2	50,00
B4.3	4	7	36,36
B4.2	18	4	81,82
B4.1	12	12	50,00
B3.3	22	3	88,00
B3.2	14	4	77,78
B3.1	6	8	42,86
B2	27	11	71,05
B1.3	4	10	28,57
B1.2	8	4	66,67
B1.1	13	10	56,52
Gesamt	152	86	63,87

Tabelle C.6: Werte der Intercoder-Übereinstimmung auf Segment-Ebene bei 75%-Codeüberlappung

Kategorie	**Übereinstimmungen**	**Nicht-Übereinstimmungen**	**prozentuale Übereinstimmung**
B5.3	2	1	66,67
B5.2	0	6	0,00
B5.1	4	5	44,44
B4.5	12	3	80,00
B4.4	2	2	50,00
B4.3	2	9	18,18
B4.2	14	8	63,64
B4.1	8	16	33,33
B3.3	16	9	64,00
B3.2	8	10	44,44
B3.1	4	10	28,57
B2.	20	18	52,63
B1.3	4	10	28,57
B1.2	8	4	66,67
B1.1	8	15	34,78
Gesamt	112	126	47,06

C.3 Intercoder-Übereinstimmung für das Kategoriensystem I

Tabelle C.7: Werte der Intercoder-Übereinstimmung für das Vorhandensein der Kategorien

Kategorie	**Übereinstim-mungen**	**Nicht-Übereinstim-mungen**	**prozentuale Übereinstim-mung**
IZ4.2	1	0	100,00
IZ4.1	2	0	100,00
IZ3.3	3	2	60,00
IZ3.2	2	2	50,00
IZ3.1	0	1	0,00
IZ2.	10	1	90,91
IZ1	1	0	100,00
IU10	4	0	100,00
IU9.2	1	0	100,00
IU9.1	4	2	66,67
IU8.4	1	1	50,00
IU8.3	7	2	77,78
IU8.1	2	0	100,00
IU7	1	0	100,00
IU6.2	0	3	0,00
IU6.1	1	0	100,00
IU5	1	0	100,00
IU3	4	4	50,00
IU2	1	1	50,00
IU1	1	1	50,00
Gesamt	47	20	70,15

Tabelle C.8: Werte der Intercoder-Übereinstimmung auf Segment-Ebene bei 25%-Codeüberlappung

Kategorie	**Übereinstimmungen**	**Nicht-Übereinstimmungen**	**prozentuale Übereinstimmung**
IZ4.2	2	0	100,00
IZ4.1	4	0	100,00
IZ3.3	6	4	60,00
IZ3.2	4	2	66,67
IZ3.1	0	3	0,00
IZ2	41	8	83,67
IZ1	2	0	100,00
IU10	8	1	88,89
IU9.2	2	0	100,00
IU9.1	8	2	80,00
IU8.4	2	1	66,67
IU8.3	14	5	73,68
IU8.1	4	1	80,00
IU7	2	0	100,00
IU6.2	0	3	0,00
IU6.1	2	0	100,00
IU5	2	0	100,00
IU3	6	6	50,00
IU2	2	1	66,67
IU1	3	1	75,00
Gesamt	114	38	75,00

Tabelle C.9: Werte der Intercoder-Übereinstimmung auf Segment-Ebene bei 75%-Codeüberlappung

Kategorie	**Übereinstimmungen**	**Nicht-Übereinstimmungen**	**prozentuale Übereinstimmung**
IZ4.2	2	0	100,00
IZ4.1	2	2	50,00
IZ3.3	6	4	60,00
IZ3.2	4	2	66,67
IZ3.1	0	3	0,00
IZ2	30	19	61,22
IZ1	2	0	100,00
IU10	4	5	44,44
IU9.2	2	0	100,00
IU9.1	6	4	60,00
IU8.4	2	1	66,67
IU8.3	8	11	42,11
IU8.1	4	1	80,00
IU7	2	0	100,00
IU6.2	0	3	0,00
IU6.1	0	2	0,00
IU5	2	0	100,00
IU3	4	8	33,33
IU2	2	1	66,67
IU1	0	4	0,00
Gesamt	82	70	53,95

C.4 Intercoder-Übereinstimmung für das Kategoriensystem *H*

Tabelle C.10: Werte der Intercoder-Übereinstimmung für das Vorhandensein der Kategorien

Kategorie	**Übereinstim-mungen**	**Nicht-Übereinstim-mungen**	**prozentuale Übereinstim-mung**
HU1	0	1	0,00
HU2	1	1	50,00
HU3	7	2	77,78
HU5.1.1	2	1	66,67
HU5.2	0	1	0,00
HU5.3	6	0	100,00
HU6	2	2	50,00
HU7.1	8	3	72,73
HU7.2	0	1	0,00
HU7.3	9	2	81,82
HU7.4	3	4	42,86
HU8.1	4	3	57,14
HU8.2	5	1	83,33
HU9	7	1	87,50
HF1	1	2	33,33
HF2	5	0	100,00
HF3	8	2	80,00
HF4.1	2	1	66,67
HF4.2	0	2	0,00
HF4.3	2	0	100,00
HF4.4	0	1	0,00
HF5.2	1	0	100,00
HF6	1	0	100,00
HF7	4	0	100,00
Gesamt	78	31	71,56

Tabelle C.11: Werte der Intercoder-Übereinstimmung auf Segment-Ebene bei 25%-Codeüberlappung

Kategorie	**Übereinstimmungen**	**Nicht-Übereinstimmungen**	**prozentuale Übereinstimmung**
HU9	17	1	94,44
HU8.2	10	1	90,91
HU8.1	10	4	71,43
HU7.4	6	4	60,00
HU7.3	22	2	91,67
HU7.2	0	1	0,00
HU7.1	18	5	78,26
HU6	4	2	66,67
HU5.3	12	1	92,31
HU5.2	0	1	0,00
HU5.1.1	4	1	80,00
HU3	20	2	90,91
HU2	2	1	66,67
HU1	0	1	0,00
HF7	8	0	100,00
HF6	2	0	100,00
HF5.2	2	0	100,00
HF4.4	0	1	0,00
HF4.3	4	0	100,00
HF4.2	0	2	0,00
HF4.1	4	2	66,67
HF3	16	2	88,89
HF2	10	0	100,00
HF1	2	2	50,00
Gesamt	173	36	82,78

Tabelle C.12: Werte der Intercoder-Übereinstimmung auf Segment-Ebene bei 75%-Codeüberlappung

Kategorie	**Übereinstim-mungen**	**Nicht-Übereinstim-mungen**	**prozentuale Übereinstim-mung**
HU9.	8	10	44,44
HU8.2	10	1	90,91
HU8.1	6	8	42,86
HU7.4	6	4	60,00
HU7.3	18	6	75,00
HU7.2	0	1	0,00
HU7.1	16	7	69,57
HU6	2	4	33,33
HU5.3	12	1	92,31
HU5.2	0	1	0,00
HU5.1.1	4	1	80,00
HU3.	16	6	72,73
HU2	2	1	66,67
HU1	0	1	0,00
HF7	8	0	100,00
HF6	2	0	100,00
HF5.2	0	2	0,00
HF4.4	0	1	0,00
HF4.3	4	0	100,00
HF4.2	0	2	0,00
HF4.1	2	4	33,33
HF3	12	6	66,67
HF2	6	4	60,00
HF1	2	2	50,00
Gesamt	136	73	65,07

C.5 Intercoder-Übereinstimmung für das Kategoriensystem *NG*

Tabelle C.13: Werte der Intercoder-Übereinstimmung für das Vorhandensein der Kategorien

Kategorie	Übereinstim-mungen	Nicht-Übereinstim-mungen	prozentuale Übereinstim-mung
NG10	3	5	37,50
NG9	2	0	100,00
NG8	4	3	57,14
NG7.2	2	2	50,00
NG7.1	2	1	66,67
NG6	1	0	100,00
NG5.2	3	3	50,00
NG5.1	0	3	0,00
NG4	4	5	44,44
NG3	5	5	50,00
NG2	3	3	50,00
Gesamt	29	30	49,15

Tabelle C.14: Werte der Intercoder-Übereinstimmung auf Segment-Ebene bei 25%-Codeüberlappung

Kategorie	Übereinstimmungen	Nicht-Übereinstimmungen	prozentuale Übereinstimmung
NG10	6	7	46,15
NG9	4	0	100,00
NG8	14	6	70,00
NG7.2	2	5	28,57
NG7.1	6	3	66,67
NG6	2	1	66,67
NG5.2	9	6	60,00
NG5.1	0	3	0,00
NG4	8	6	57,14
NG3	10	7	58,82
NG2	6	6	50,00
Gesamt	67	50	57,26

Tabelle C.15: Werte der Intercoder-Übereinstimmung auf Segment-Ebene bei 75%-Codeüberlappung

Kategorie	**Übereinstimmungen**	**Nicht-Übereinstimmungen**	**prozentuale Übereinstimmung**
NG10	6	7	46,15
NG9	4	0	100,00
NG8	6	14	30,00
NG7.2	2	5	28,57
NG7.1	6	3	66,67
NG6	0	3	0,00
NG5.2	4	11	26,67
NG5.1	0	3	0,00
NG4	4	10	28,57
NG3	4	13	23,53
NG2	4	8	33,33
Gesamt	40	77	34,19

C.6 Intercoder-Übereinstimmung für das Kategoriensystem *NV*

Tabelle C.16: Werte der Intercoder-Übereinstimmung für das Vorhandensein der Kategorien

Kategorie	**Übereinstim-mungen**	**Nicht-Übereinstim-mungen**	**prozentuale Übereinstim-mung**
NV10	2	2	50,00
NV9	2	1	66,67
NV8	2	1	66,67
NV7.2	6	1	85,71
NV7.1	6	2	75,00
NV6	4	0	100,00
NV5.2	6	3	66,67
NV5.1	7	3	70,00
NV4	4	0	100,00
NV3	3	0	100,00
NV2	2	1	66,67
NV1	3	1	75,00
Gesamt	47	15	75,81

Tabelle C.17: Werte der Intercoder-Übereinstimmung auf Segment-Ebene bei 25%-Codeüberlappung

Kategorie	**Übereinstimmungen**	**Nicht-Übereinstimmungen**	**prozentuale Übereinstimmung**
NV10	4	2	66,67
NV9	4	1	80,00
NV8	4	2	66,67
NV7.2	23	4	85,19
NV7.1	12	5	70,59
NV6	8	0	100,00
NV5.2	12	6	66,67
NV5.1	14	11	56,00
NV4	8	4	66,67
NV3	6	0	100,00
NV2	4	1	80,00
NV1	8	1	88,89
Gesamt	107	37	74,31

Tabelle C.18: Werte der Intercoder-Übereinstimmung auf Segment-Ebene bei 75%-Codeüberlappung

Kategorie	Übereinstim-mungen	Nicht-Übereinstim-mungen	prozentuale Übereinstim-mung
NV10	2	4	33,33
NV9	4	1	80,00
NV8	4	2	66,67
NV7.2	14	13	51,85
NV7.1	8	9	47,06
NV6	8	0	100,00
NV5.2	10	8	55,56
NV5.1	8	17	32,00
NV4	8	4	66,67
NV3	4	2	66,67
NV2	4	1	80,00
NV1	6	3	66,67
Gesamt	80	64	55,56

D Übersicht zu den Teilnehmenden der Studie

Tabelle D.1: Übersicht zu den befragten Lehrkräften (grau markiert : Lehrkräfte, deren Datensätze in Phase 1 des Auswertungsprozesses (siehe Abbildung 5.4, S. 163) einbezogen wurden; **fettgedruckt**: Lehrkräfte, deren Datensätze in das Intercoding einbezogen wurden)

Lehrkraft	Geschlecht	Schulart[1]	Altersgruppe[2]	Dienstjahre	weitere Fächer[3]	Erfahrung Sek. II[4]	SRT unterrichtet[5]
L1F1	weibl.	Gym	50-59	21-30	Ma	GK|LK	GK|LK
L2F1	männl.	Gym	50-59	min. 31	Ma|Info	LK	LK
L3F1	weibl.	Gym	40-49	11-20	-	GK|LK	GK|LK
L4F1	weibl.	Abendgym	min. 60	21-30	Ma	GK|LK	GK|LK
L5F1	weibl.	Gym	50-59	21-30	Ma	nein	nein
L6F1	männl.	Gym	-	-	-	LK	LK
L7F2	weibl.	Gym	min. 60	21-30	Ma	nein	nein
L8F2	männl.	Gym	30-39	max. 5	Ma	LK	LK
L9F2	weibl.	Gym	50-59	21-30	Ma	LK	LK
L10F2	männl.	Gym	50-59	21-30	Ma	nein	nein
L11F2	weibl.	Gym	-	-	-	-	-
L12F2	männl.	Gym	min. 60	min. 31	Ma	LK	LK
L13F2	weibl.	Gym	50-59	min. 31	Ma|Latein	nein	nein
L14F3	männl.	Gym	-	min. 31	Ma	GK|LK	GK|LK
L15F3	weibl.	Gym	50-59	min. 31	Ma	GK|LK	LK
L16F3	weibl.	BBS	40-49	21-30	Ma|Info	nein	nein
L17F3	männl.	Gym	50-59	21-30	Ma|Info	GK|LK	LK
L18F3	weibl.	Gym	40-49	11-20	Ma	GK|LK	LK
L19F3	männl.	Gym	min. 60	min. 31	Ma	GK|LK	LK

[1]Gym: Gymnasium, BBS: Berufsbildende Schule, OS: Oberschule, Abendgym: Abendgymnasium, BGym: Berufliches Gymnasium
[2]in Jahren
[3]Unterrichtsfächer, für die eine Lehrbefähigung vorliegt, Ma: Mathematik, Info: Informatik, Astro: Astronomie
[4]Lehrerfahrung im Physikunterricht der Sekundarstufe II, GK: Grundkurs, LK: Leistungskurs
[5]Unterrichtserfahrung zum Thema Spezielle Relativitätstheorie, GK: Grundkurs, LK: Leistungskurs

Tabelle D.1: Übersicht zu den befragten Lehrkräften (Fortsetzung)

L20F3	männl.	Gym	50-59	min. 31	Ma|Info	GK	GK
L21F4	weibl.	Gym	30-39	6-10	Ma	nein	nein
L22F4	weibl.	Gym	40-49	11-20	Ma|Astro	GK	GK
L23F4	männl.	Gym	40-49	11-20	Ma|Info	GK|LK	LK
L24F4	weibl.	Gym	min. 60	min. 31	Ma	GK|LK	GK|LK
L25F4	männl.	Gym	50-59	21-30	Ma	GK|LK	GK|LK
L26F4	männl.	Gym	50-59	21-30	Ma|Info	GK|LK	GK|LK
L27F4	weibl.	BBS	30-39	max. 5	-	nein	nein
L28F4	weibl.	Gym	50-59	min. 31	Ma	GK|LK	GK|LK
L29F5	weibl.	Gym	50-59	min. 31	Ma	GK|LK	GK|LK
L30F5	männl.	Gym	min. 60	min. 31	Ma	GK|LK	GK|LK
L31F5	weibl.	Gym	30-39	11-20	Ma	nein	nein
L32F5	weibl.	Gym	30-39	max. 5	Ma	GK	GK
L33F5	weibl.	BBS	40-49	21-30	Ma	GK	nein
L34F5	männl.	Gym	50-59	21-30	Ma	GK|LK	GK|LK
L35F5	weibl.	Gym	50-59	21-30	Ma	GK|LK	GK|LK
L36F5	weibl.	Gym	40-49	11-20	Ma	GK	GK
L37F5	männl.	Gym	50-59	21-30	Ma	GK|LK	nein
L38F6	weibl.	Gym	40-49	21-30	Ma|Astro	GK	GK
L39F6	weibl.	Gym	40-49	11-20	Ma	GK|LK	GK|LK
L40F6	männl.	BBS	50-59	21-30	Technik	GK	nein
L41F6	weibl.	Gym	50-59	min. 31	-	LK	LK
L42F6	männl.	Gym	50-59	min. 31	Ma	GK|LK	GK
L43F6	männl.	OS|BGym	mind. 60	min. 31	-	GK	nein

Tabelle D.2: Übersicht zu den befragten Studierenden (grau markiert : Studierende, deren Datensätze in Phase 1 des Auswertungsprozesses (siehe Abbildung 5.4, S. 163) einbezogen wurden; **fettgedruckt**: Studierende, deren Datensätze in das Intercoding einbezogen wurden)

Student/in	Geschlecht	Schulart[6]	Altersgruppe[7]	Semester	2. Fach[8]	SRT unterrichtet[9]
S1B1	männl.	Gym	20-25	8	Latein	nein
S2B1	männl.	Gym	20-25	8	Ma	nein
S3B1	männl.	Gym	20-25	8	Info	nein
S4B1	männl.	Gym	20-25	8	Ma	nein
S5B1	weibl.	Gym	20-25	8	Deu	nein
S6B1	männl.	Gym	20-25	8	Ma	nein
S7B1	männl.	Gym	20-25	6	Mu	nein
S8B1	weibl.	Gym	20-25	8	Ma	nein
S9B1	weibl.	Gym	26-30	5	Ma	nein
S10B1	weibl.	Gym	20-25	8	Ma	nein
S11B1	weibl.	Gym	20-25	8	Ma	nein
S12B2	weibl.	Gym	20-25	-	Ma	nein
S13B2	männl.	Gym	20-25	-	Ge	nein
S14B2	weibl.	Gym	20-25	10	Ma	nein
S15B2	männl.	Gym	20-25	8	Geo	nein
S16B2	männl.	Gym	20-25	-	Latein	nein
S17B2	männl.	Gym	20-25	8	Info	nein
S18B2	männl.	Gym	20-25	-	Info	nein
S19B2	männl.	Gym	20-25	-	Info	nein
S20B2	männl.	Gym	20-25	8	Geo	nein
S21B2	weibl.	Gym	26-30	6	Ma	nein
S22B2	männl.	Gym	26-30	9	Eth/Philo	nein

[6]Schulart entsprechend des Studiengangs, Gym: Gymnasium
[7]in Jahren
[8]zweites studiertes Fach im Lehramt, Ma: Mathematik, Info: Informatik, Geo: Geografie, Deu: Deutsch, Ge: Geschichte, Eth/Philo: Ethik/Philosophie, Mu: Musik
[9]Unterrichtserfahrung zum Thema Spezielle Relativitätstheorie, GK: Grundkurs, LK: Leistungskurs

E Ergebnisse der Laborstudie

E.1 Massekonzepte der Befragten

Den gegebenen Antworten im Fragebogen 1 werden die folgenden Werte zugeordnet (F 1.1 bis F 2.5: Items zu den inhaltlichen Fragen):

Item	**Antwort**	**Massekonzept**	**zugeordneter Wert**
F 1.1	1	invariant (Ansatz 2)	-1
	2	relativ (Ansatz 1)	1
	3	relativ (Ansatz 1)	1
F 1.2	1	? (unklar, nicht eindeutig)	0
	2	relativ (Ansatz 1)	1
	3	relativ (Ansatz 1)	1
F 2.1	wahr	relativ (Ansatz 1)	1
	falsch	invariant (Ansatz 2)	-1
F 2.2	wahr	invariant (Ansatz 2)	-1
	falsch	relativ (Ansatz 1)	1
F 2.3	wahr	relativ (Ansatz 1)	1
	falsch	invariant (Ansatz 2)	-1
F 2.4	wahr	relativ (Ansatz 1)	1
	falsch	invariant (Ansatz 2)	-1
F 2.5	wahr	invariant (Ansatz 2)	-1
	falsch	relativ (Ansatz 1)	1

Den Stufen der Sicherheitsskala werden die folgenden Gewichte zugeordnet (S 1.1 bis S 2.5: Items zur Einschätzung der Sicherheit einer Antwort):

Stufe	**zugeordnetes Gewicht**
sehr unsicher	1
...	2
...	3
sehr sicher	4

Das Gewicht zum Item S 1.2 wird auf 0 gesetzt, wenn der Antwort zu Item F 1.2 der Wert 0 zugeordnet wurde, damit indifferente Antworten (eine eindeutige Zuordnung zu einem der beiden Massekonzepte ist bei Item F 1.2 für Antwort 1 nicht möglich) nicht in die Berechnung von MW (siehe unten) eingehen. Zum Umgang mit fehlenden Werten ist festzuhalten: Für

L28F4 fehlen alle Gewichte entsprechend der Sicherheitsskala, darum wurden alle gegebenen Antworten gleich gewichtet (zugeordnetes Gewicht: 1). Aufgrund der fehlenden Werte von L33F5 bei F 2.3 und S 2.3 wurden diese Items nicht in der Berechnung von MW berücksichtigt. Da bei L36F5 kein Wert für S 2.2 vorhanden ist, wurde das zugehörige Gewicht auf 0 gestzt, so dass die Antwort zu F 2.2 nicht in die Berechnung von MW eingeht.

Das gewichtete arithmetische Mittel MW ergibt sich aus den Werten, die den Antworten im Fragebogen zugeordnet wurden, und den zugehörigen Gewichten entsprechend der Sicherheitsskala. Den Werten für das gewichtete arithmetische Mittel MW wird gemäß der folgenden Regeln ein Massekonzept zugeordnet:

$\mathrm{MW} > 0{,}2$: relativ (Massekonzept entspricht eher Ansatz 1)
$\mathrm{MW} < -0{,}2$: invariant (Massekonzept entspricht eher Ansatz 2)
$-0{,}2 \leqq \mathrm{MW} \leqq 0{,}2$: ? (Massekonzept unklar, nicht eindeutig)

Tabelle E.4: Bestimmung der Massekonzepte der Lehrkräfte anhand der Antworten im Fragebogen 1

Lehrkräfte	F 1.1	S 1.1	F 1.2	S 1.2	F 2.1	S 2.1	F 2.2	S 2.2	F 2.3	S 2.3	F 2.4	S 2.4	F 2.5	S 2.5	MW	Masse-konzept
L1F1	1	3	0	0	1	3	-1	2	1	2	1	4	1	3	0,76	relativ
L2F1	1	3	1	3	1	3	-1	2	1	3	1	3	1	3	0,80	relativ
L3F1	1	4	0	0	1	3	-1	4	1	4	-1	3	1	3	0,33	relativ
L4F1	1	2	0	0	1	2	-1	2	1	4	1	4	-1	2	0,50	relativ
L5F1	1	2	0	0	1	2	-1	2	-1	2	1	2	1	2	0,33	relativ
L6F1	1	3	0	0	1	4	-1	4	1	4	-1	4	1	4	0,30	relativ
L7F2	-1	3	0	0	1	2	-1	2	1	2	-1	2	-1	3	-0,43	invariant
L8F2	1	1	0	0	1	4	-1	2	1	4	1	3	-1	2	0,50	relativ
L9F2	1	3	0	0	1	3	1	2	1	2	1	2	1	2	1,00	relativ
L10F2	1	2	0	0	1	2	1	3	-1	2	1	2	-1	2	0,38	relativ
L11F2	1	3	0	0	1	4	1	1	1	3	1	3	1	3	1,00	relativ
L12F2	1	3	0	0	1	4	-1	3	-1	2	1	3	1	2	0,41	relativ
L13F2	1	3	0	0	1	3	1	3	1	1	1	2	1	2	1,00	relativ
L14F3	-1	3	0	0	1	3	1	3	1	3	1	3	-1	3	0,33	relativ
L15F3	1	3	0	0	1	3	-1	3	1	3	1	3	-1	2	0,41	relativ
L16F3	1	2	0	0	1	2	-1	2	-1	2	-1	2	-1	2	-0,33	invariant
L17F3	1	3	0	0	1	3	1	3	1	3	1	3	-1	3	0,67	relativ
L18F3	1	3	0	0	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1,00	relativ
L19F3	1	2	1	3	1	3	-1	2	1	4	1	4	1	2	0,80	relativ
L20F3	1	2	0	0	1	3	1	2	-1	2	1	3	1	2	0,71	relativ
L21F4	-1	2	1	2	-1	2	-1	2	-1	3	-1	4	-1	2	-0,76	invariant
L22F4	1	4	0	0	-1	3	1	4	-1	3	1	4	1	2	0,40	relativ
L23F4	1	3	0	0	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1,00	relativ
L24F4	1	2	0	0	1	3	-1	2	1	2	1	3	-1	2	0,43	relativ
L25F4	-1	4	0	0	1	4	-1	4	1	4	-1	4	1	4	0,00	?
L26F4	1	3	0	0	1	4	1	3	-1	3	1	4	1	4	0,71	relativ
L27F4	-1	2	0	0	-1	3	-1	3	-1	3	-1	3	-1	2	-1,00	invariant
L28F4	1		0	0	1		1				1				1,00	relativ
L29F5	1	2	0	0	1	1	1	1	1	2	-1	2	-1	2	0,20	?
L30F5	1	4	0	0	1	4	1	2	1	3	-1	3	-1	2	0,44	relativ
L31F5	1	3	0	0	1	3	1	3	-1	1	-1	1	1	3	0,71	relativ
L32F5	1	1	0	0	1	1	1	2	-1	2	1	1	-1	2	0,11	?
L33F5	1	1	0	0	1	2	-1	1			1	4	-1	1	0,56	relativ
L34F5	1	2	0	0	1	2	1	2	1	2	1	2	-1	2	0,67	relativ
L35F5	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	-1	3	0,71	relativ
L36F5	1	2	0	0	-1	3	-1		-1	2	1	3	-1	1	-0,09	?
L37F5	1	2	0	0	1	3	1	3	1	3	-1	2	-1	3	0,38	relativ
L38F6	1	2	0	0	1	2	1	3	-1	3	-1	3	1	2	0,20	?
L39F6	1	4	0	0	1	4	1	3	1	3	1	4	1	3	1,00	relativ
L40F6	1	2	0	0	1	2	-1	2	-1	2	-1	2	1	2	0,00	?
L41F6	-1	3	0	0	-1	2	-1	2	-1	2	1	4	-1	2	-0,47	invariant
L42F6	1	2	0	0	1	2	1	2	1	2	1	2	-1	2	0,67	relativ
L43F6	1	2	0	0	1	2	1	2	-1	2	-1	3	1	2	0,23	relativ

Tabelle E.5: Bestimmung der Massekonzepte der Studierenden anhand der Antworten im Fragebogen 1

Student/in	F 1.1	S 1.1	F 1.2	S 1.2	F 2.1	S 2.1	F 2.2	S 2.2	F 2.3	S 2.3	F 2.4	S 2.4	F 2.5	S 2.5	MW	Masse-konzept
S1B1	-1	2	0	0	-1	2	-1	2	-1	1	1	2	-1	1	-0,60	invariant
S2B1	-1	3	0	0	-1	4	1	3	1	1	1	2	1	3	0,13	?
S3B1	-1	3	0	0	1	3	-1	2	1	1	-1	1	-1	1	-0,27	invariant
S4B1	1	3	0	0	1	3	1	3	-1	3	1	3	1	3	0,67	relativ
S5B1	1	1	0	0	1	1	-1	3	-1	2	-1	3	-1	2	-0,67	invariant
S6B1	1	2	0	0	1	2	1	3	-1	2	1	2	1	2	0,69	relativ
S7B1	1	2	0	0	1	2	1	3	-1	3	1	3	-1	3	0,25	relativ
S8B1	1	2	0	0	1	3	1	2	-1	1	1	3	1	1	0,83	relativ
S9B1	-1	1	1	1	1	1	1	1	-1	2	-1	1	1	1	0,00	?
S10B1	1	2	0	0	-1	2	1	2	-1	3	-1	4	-1	2	-0,47	invariant
S11B1	1	2	0	0	-1	2	1	2	-1	2	1	2	1	2	0,33	relativ
S12B2	1	2	0	0	1	2	1	2	1	2	1	3	1	2	1,00	relativ
S13B2	1	2	1	2	1	1	-1	1	1	1	-1	2	1	1	0,40	relativ
S14B2	1	3	0	0	1	2	1	1	-1	3	-1	2	1	2	0,23	relativ
S15B2	-1	2	1	2	-1	2	-1	3	-1	1	-1	4	1	3	-0,41	invariant
S16B2	1	1	0	0	1	1	-1	1	-1	1	-1	2	1	1	-0,14	?
S17B2	1	2	0	0	-1	3	1	3	1	2	1	2	1	3	0,60	relativ
S18B2	1	2	0	0	1	3	-1	3	-1	2	-1	3	1	3	0,00	?
S19B2	-1	3	0	0	1	4	1	3	1	4	-1	3	-1	2	0,16	?
S20B2	1	3	0	0	1	3	-1	4	1	3	-1	3	-1	3	-0,05	?
S21B2	1	3	1	2	1	3	-1	2	1	2	-1	2	1	3	0,53	relativ
S22B2	1	4	1	4	1	4	-1	2	-1	1	1	4	-1	2	0,52	relativ

Tabelle E.6: Bestimmung der Massekonzepte einiger Lehrkräfte anhand der Äußerungen in den Gedankenlisten zu den Textmaterialien 1 und 2

Lehrkraft	relevantes Coding	Kategorie	Massekonzept
L1F1	Der relativistische Massezuwachs ist bei der Berechnung von Geschw. von e- in elmag. Feldern wichtig.	G 6.5.1	relativ
L4F1	Wenn v«c, dann ist es in Ordnung, dass man nur über eine Masse (einfach Masse) spricht. Sonst bin ich auf der Seite des sächs. Lehrplans.	G 6.4.1	relativ
L8F2	m ist größer geworden	G 5.4	relativ
L9F2	Das nicht Einführen der bewegten Masse finde ich falsch	G 6.5.1	relativ
L12F2	Quelle 2: Aussage entspricht nicht meinem „Weltbild“	G 4.4	relativ
L14F3	invariante Masse unterrichtet	teilnehmende Beobachtung	invariant
L15F3	Teilchenbeschleuniger –> Sek. I auch schon mit m_{bewegt} diskutieren	G 7.1	relativ
L18F3	Ich widerspreche Teil 2. Unterscheidung wichtig z.B. für Beschleunigung gel. Teilchen im E-Feld	G 6.5.1	relativ
L19F3	Die Tatsache m=f(v) schafft keine Widersprüche, sondern sie beseitigt sie, denn $m = m_0$ für v klein gilt ja im Alltag und ist also kein Widerspruch, sondern Sonderfall.	G 5.2	relativ
L20F3	Danach ist die relativistische Masse zu betrachten.	G 6.4.1	relativ
L23F4	Problem in Quelle 1 –> Gleichung zur Masse fehlt	G 7.1	relativ
L24F4	LK-Schüler sollten von diesen Inhalten wissen	G 7.1	relativ
L25F4	jedoch ist die geschwindigkeitsabhängige Massenzunahme empirisch nachweisbar	G 6.5.1	relativ

Tabelle E.6: Bestimmung der Massekonzepte einiger Lehrkräfte anhand der Äußerungen in den Gedankenlisten zu den Textmaterialien 1 und 2 (Fortsetzung)

L26F4	Die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Masse ist experimentell erwiesen	G 6.5.1	relativ
L27F4	bislang war die Masse eines Körpers für mich eine Konstante, ortsunabhängige Größe	G 4.1	invariant
L29F5	Unterrichtsmaterial 1 liest sich für mich „besser“ und ist übersichtlicher dargestellt. Es entspricht meiner Anschauung	G 4.3	relativ
L30F5	Dass die Masse von der Geschw. abhängt, ist keine Idee sondern Realität.	G 6.4.1	relativ
L36F5	Masse ist nicht unveränderbar	G 6.4.1	relativ
L38F6	sinnvoll Ruhemasse/bewegte Masse	G 6.4.1	relativ
L43F6	Masse ist abhängig vom Bezugssystem!	G 6.4.1	relativ

Tabelle E.7: Bestimmung der Massekonzepte einiger Studierenden anhand der Äußerungen in den Gedankenlisten zu den Textmaterialien 1 und 2

Student/in	relevantes Coding	Kategorie	Massekonzept
S4B1	Trennung und Abgrenzung von m und m_0 finde ich besser	G 6.4.1	relativ
S5B1	Meiner Meinung nach sollten die SuS den Begriff der bewegten Masse kennenlernen, um relativistische Vorgänge in der Physik zu begreifen	G 7.1	relativ
S6B1	im Prinzip kann jede dyn. Masse durch Wahl eines entsprechenden Bezugssystems erreicht werden	G 4.1	relativ
S7B1	Ich glaube es ist experimentell bewiesen, dass $m_0 \neq m_{bewegt}$	G 6.5.1	relativ
S8B1	Für Leistungskurs ok, im GK würde ich die bewegte Masse vielleicht einführen (je nach Leistungsstärke der Klasse)	G 7.1	relativ
S9B1	Wie erklärt man denn dann später eine relativistische Massenzunahme?	G 4.4	relativ
S10B1	wir haben in der Vorlesung KeT durchaus mit dynamischen Massen gerechnet...	G 3.1	relativ
S11B1	mein Verständnis: ... bewegte Masse = veränderte Masse bei bewegten Teilchen, abhängig von Inertialsystem	G 4.1	relativ
S13B2	Es macht schon Sinn, dass die Masse eines Objektes mit der Geschwindigkeit zunimmt	G 6.4.1	relativ
S14B2	UM2: besseres Verständnis, in UM1 schwer nachzuvollziehen, dass Masse größer wird	G 4.3	relativ
S15B2	für mich sinnvoller und notwendig Relativität der Masse zu lehren	G 7.1	relativ

Tabelle E.7: Bestimmung der Massekonzepte einiger Studierenden anhand der Äußerungen in den Gedankenlisten zu den Textmaterialien 1 und 2 (Fortsetzung)

S17B2	meiner Meinung nach sollten physikalische Sachverhalte den Schülern korrekt und vollständig vermittelt werden, dies bedeutet auch den Vergleich von Ruhemasse und dynamischer Masse auf entsprechendem Niveau	G 6.5.1	relativ
S18B2	–> Unterscheidung betonen, ab wann m_{bewegt} gilt (v). –> für Alltag o.k., weil v«c	G 4.3	relativ
S19B2	mit v steigt m –> klar, darum ja Teilchen mit Masse nie Lichtgeschwindigkeit	G 4.3	relativ
S21B2	Bewegt sich das Teilchen, wird es schwerer	G 6.4.1	relativ
S22B2	Für mich gehört die Relativität der Masse auch zum Kern der speziellen Relativitätstheorie.	G 6.4.1	relativ

Tabelle E.8: Massekonzepte der Lehrkräfte vor und nach der Auseinandersetzung mit der Kontroverse zur Relativität der Masse

Lehrkraft	vorher			nachher
	Massekonzept Fragebogen 1	Massekonzept Gedankenlisten	Massekonzept resultierend	Positionierung Fragebogen 2
L1F1	relativ	relativ	relativ	?
L2F1	relativ		relativ	unentschieden
L3F1	relativ		relativ	
L4F1	relativ	relativ	relativ	relativ
L5F1	relativ		relativ	relativ
L6F1	relativ		relativ	relativ
L7F2	invariant		invariant	invariant
L8F2	relativ	relativ	relativ	relativ
L9F2	relativ	relativ	relativ	relativ
L10F2	relativ		relativ	unentschieden
L11F2	relativ		relativ	relativ
L12F2	relativ	relativ	relativ	relativ
L13F2	relativ		relativ	relativ
L14F3	relativ	invariant	invariant	invariant
L15F3	relativ	relativ	relativ	unentschieden
L16F3	invariant		invariant	relativ
L17F3	relativ		relativ	relativ
L18F3	relativ	relativ	relativ	relativ
L19F3	relativ	relativ	relativ	relativ
L20F3	relativ	relativ	relativ	relativ
L21F4	invariant		invariant	unentschieden
L22F4	relativ		relativ	unentschieden
L23F4	relativ	relativ	relativ	relativ
L24F4	relativ	relativ	relativ	unentschieden
L25F4	?	relativ	relativ	relativ
L26F4	relativ	relativ	relativ	unentschieden
L27F4	invariant	invariant	invariant	invariant
L28F4	relativ		relativ	relativ
L29F5	?	relativ	relativ	relativ
L30F5	relativ	relativ	relativ	relativ
L31F5	relativ		relativ	
L32F5	?		?	relativ
L33F5	relativ		relativ	relativ
L34F5	relativ		relativ	
L35F5	relativ		relativ	unentschieden
L36F5	?	relativ	relativ	unentschieden

Tabelle E.8: Massekonzepte der Lehrkräfte vor und nach der Auseinandersetzung mit der Kontroverse zur Relativität der Masse (Fortsetzung)

L37F5	relativ		relativ	relativ
L38F6	?	relativ	relativ	relativ
L39F6	relativ		relativ	relativ
L40F6	?		?	relativ
L41F6	invariant		invariant	unentschieden
L42F6	relativ		relativ	relativ
L43F6	relativ	relativ	relativ	relativ

Tabelle E.9: Massekonzepte der Studierenden vor und nach der Auseinandersetzung mit der Kontroverse zur Relativität der Masse

	vorher			**nachher**
Lehrkraft	Massekonzept Fragebogen 1	Massekonzept Gedankenlisten	Massekonzept resultierend	Positionierung Fragebogen 2
S1B1	invariant		invariant	unentschieden
S2B1	?		?	relativ
S3B1	invariant		invariant	relativ
S4B1	relativ	relativ	relativ	relativ
S5B1	invariant	relativ	?	unentschieden
S6B1	relativ	relativ	relativ	relativ
S7B1	relativ	relativ	relativ	relativ
S8B1	relativ	relativ	relativ	relativ
S9B1	?	relativ	relativ	unentschieden
S10B1	invariant	relativ	relativ	unentschieden
S11B1	relativ	relativ	relativ	relativ
S12B2	relativ		relativ	unentschieden
S13B2	relativ	relativ	relativ	unentschieden
S14B2	relativ	relativ	relativ	invariant
S15B2	invariant	relativ	?	unentschieden
S16B2	?		?	unentschieden
S17B2	relativ	relativ	relativ	relativ
S18B2	?	relativ	relativ	unentschieden
S19B2	?	relativ	relativ	relativ
S20B2	?		?	invariant
S21B2	relativ	relativ	relativ	unentschieden
S22B2	relativ	relativ	relativ	invariant

E.2 Übersicht der ausgewerteten Datensätze

Tabelle E.10: Anzahl der jeweils ausgewerteten Datensätze der Studienteilnehmenden und Angabe nicht in die Auswertung einbezogenen Datensätze

	Anzahl der ausgewerteten Datensätze		**nicht in die Auswertung einbezogene Datensätze**	
	Lehrkräfte	Studierende	Lehrkräfte	Studierende
Kategoriensystem *G*	39	22	L7F2, L34F5, L39F6, L40F6	
Kategoriensystem *B*	39	22	L7F2, L34F5, L39F6, L40F6	
Kategoriensystem *I*, *Lernziele*	32	22	L1F1, L3F1, L4F1, L10F2, L13F2, L22F4, L31F5, L34F5, L35F5, L36F5, L39F6	
Kategoriensystem *I*, *Vorgehen im Unterricht*	28	21	L3F1, L8F2, L11F2, L12F2, L16F3, L25F4, L28F4, L31F5, L32F5, L34F5, L35F5, L36F5, L39F6, L40F6, L42F6	S5B1
Kategoriensystem *H*, *Umsetzung im Unterricht*	31	20	L8F2, L10F2, L11F2, L16F3, L25F4, L29F5, L31F5, L34F5, L35F5, L36F5, L39F6, L42F6	S3B1, S5B1
Kategoriensystem *H*, *nach Feedback*	25	16	L3F1, L8F2, L11F2, L14F3, L16F3, L22F4, L25F4, L28F4, L31F5, L32F5 L34F5, L35F5, L36F5, L37F5, L39F6, L40F6, L41F6, L42F6	S1B1, S3B1, S5B1, S9B1, S10B1, S19B2
Kategoriensystem *NG*	39	22	L7F2, L34F5, L39F6, L40F6	
Kategoriensystem *NV*	33	21	L8F2, L11F2, L16F3, L25F4, L31F5, L34F5, L35F5, L36F5, L39F6, L42F6	S5B1



VERZEICHNISSE

Abbildungsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Literaturverzeichnis

Abd-El-Khalick, Fouad (2012). „Examining the Sources for our Understandings about Science: Enduring conflations and critical issues in research on nature of science in science education“. In: *International Journal of Science Education* 34.3, S. 353–374.

– (2013). „Teaching With and About Nature of Science, and Science Teacher Knowledge Domains“. In: *Science & Education* 22, S. 2087–2107.

Abd-El-Khalick, Fouad und Saouma BouJaoude (1997). „An exploratory study of the knowledge base forscience teaching“. In: *Journal of Research in Science Teaching* 34.7, S. 673–699.

Abd-El-Khalick, Fouad und Norman G. Lederman (2000). „Improving science teachers' conceptions of nature of science: a critical review of the literature“. In: *International Journal of Science Education* 22.7, S. 665–701.

Ackermann, Peter et al. (2015). *Fokus Physik. Gesamtband SII*. 1. Auflage. Berlin: Cornelsen.

Adler, Carl G. (1987). „Does mass really depend on velocity, dad?“ In: *American Journal of Physics* 55.8, S. 739–743.

Albe, Virginie (2008). „Students' positions and considerations of scientific evidence about a controversial socioscientific issue“. In: *Science & Education* 17, 805–827.

Allchin, Douglas (2011). „Evaluating Knowledge of the Nature of (Whole) Science“. In: *Science Education*, S. 518–542.

– (2012). „Toward Clarity on Whole Science and KNOWS“. In: *Science Education* 96.4, S. 693–700.

Allchin, Douglas, H. M. Andersen und Keld Nielsen (2014). „Complementary Approaches to Teaching Nature of Science: Integrating Student Inquiry, Historical Cases, and Contemporary Cases in Classroom Practice“. In: *Science Education* 98.3, S. 461–486.

Anderl, Sibylle (11. Okt. 2019). „Messfehler oder die Auflösung der Krise?“ Version aktualisiert am 11.10.2019, 11:44 Uhr. In: *Frankfurter Allgemeine Zeitung (FAZ.NET)*. URL: `https://www.faz.net/aktuell/wissen/weltraum/kann-die-krise-der-kosmologie-aufgeloest-werden-16421968.html#void`.

Apolin, Martin (2019). *Big Bang 2. Physik Oberstufe*. 1. Auflage. Stuttgart: Ernst Klett Verlag.

Archila, Pablo Antonio, Jorge Molina und Anne-Marie Truscott de Mejía (2020). „Using Historical Scientific Controversies to Promote Undergraduates' Argumentation“. In: *Science & Education* 29, 647–671.

Asimeng-Boahene, Lewis (2007). „Creating strategies to deal with problems of teaching controversial issues in social studies education in African schools“. In: *Intercultural Education* 18.3, S. 231–242.

Aslanides, J. S. und C. M. Savage (2013). „Relativity concept inventory: Development, analysis, and results“. In: *Physical Review Special Topics - Physics Education Research* 9 (010118), S. 1–10.

Atkin, Keith (2015). „The teaching of mechanics: some criticisms, and suggestions for a rational approach“. In: *Physics Education* 50.1, S. 46–51.

Aubrecht, Gordon J. (2004). „Comment on „Apparatus to measure relativistic mass increase“, by John W. Luetzelschwab (Am. J. Phys. 71 (9), 878-884 (2003))“. In: *American Journal of Physics* 72.7, S. 970–971.

Aufschnaiter, Claudia von (2014). „Laborstudien zur Untersuchung von Lernprozessen“. In: *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Hrsg. von Dirk Krüger, Ilka Parchmann und Horst Schecker. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, S. 81–94.

Aufschnaiter, Claudia von und Helmut Prechtl (2018). „Argumentieren im naturwissenschaftlichen Unterricht“. In: *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Hrsg. von Dirk Krüger, Ilka Parchmann und Horst Schecker. Berlin: Springer, S. 87–104.

Bader, Franz, Hrsg. (2010). *Dorn/Bader. Physik. Gymnasium SEK II*. Braunschweig: Schroedel.

Baltas, Aristides (2000). „Classifying Scientific Controversies“. In: *Scientific Controversies: Philosophical and Historical Perspectives*. Hrsg. von Peter Machamer, Marcello Pera und Aristides Baltas. Oxford: Oxford University Press, S. 40–49.

Bartelmann, M. et al. (2015). *Theoretische Physik*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.

Bartelmann, Matthias et al. (2018). *Theoretische Physik 3. Quantenmechanik*. Berlin: Springer Spektrum.

Baumert, Jürgen und Mareike Kunter (2006). „Stichwort: Professionelle Handlungskompetenz von Lehrkräften“. In: *Zeitschrift für Erziehungswissenschaft* 9.4, S. 469–520.

Bächtold, Manuel, David Cross und Valérie Munier (2019). „How to Assess and Categorize Teachers’ Views of Science? Two Methodological Issues“. In: *Research in Science Education*. URL: `https://doi.org/10.1007/s11165-019-09904-x` (besucht am 04. 02. 2021).

Bell, R., N. G. Lederman und F. Abd-El-Khalick (2000). „Developing and acting upon one’s conception of the nature of science: A follow-up study“. In: *Journal of Research in Science Teaching* 37.6, 563–581.

Bell, Randy L. und Norman G. Ledermann (2003). „Understandings of the Nature of Science and Decision Making on Science and Technology Based Issues“. In: *Science Education* 87, S. 352–377.

Bethge, Klaus und Ulrich E. Schröder (2006). *Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen*. 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. Weinheim: WILEY-VCH.

Betsch, Tilmann, Joachim Funke und Henning Plessner (2011). *Denken – Urteilen, Entscheiden, Problemlösen. Allgemeine Psychologie für Bachelor*. Berlin Heidelberg: Springer.

Betsch, Tilmann, Susanne Haberstroh und Cornelia Höhle (2002). „Explaining Routinized Decision Making: A Review of Theories and Models“. In: *Theory & Psychology* 12 (4), S. 453–488.

Beyvers, Gottfried und Elvira Krusch (2009). *Kleines 1x1 der Relativitätstheorie. Einsteins Physik mit Mathematik der Mittelstufe*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.

Bickerstaff, R. P. und G. Patsakos (1995). „Relativistic generalizations of mass“. In: *European Journal of Physics* 16, S. 63–66.

Bierhoff, Hans-Werner und Franz Petermann (2014). *Forschungsmethoden der Psychologie*. Göttingen: Hogrefe.

Bleck-Neuhaus, Jörn (2013). *Elementare Teilchen. Von den Atomen über das Standard-Modell bis zum Higgs-Boson*. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.

Blüggel, Lars et al. (2019). *Impulse Physik. Oberstufe*. 1. Auflage. Stuttgart, Leipzig: Ernst Klett Verlag.

Boblest, Sebastian, Thomas Müller und Günter Wunner (2016). *Spezielle und allgemeine Relativitätstheorie. Grundlagen, Anwendungen in Astrophysik und Kosmologie sowie relativistische Visualisierung*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.

Borgerding, Lisa A. und Murat Dagistan (2018). „Preservice science teachers' concerns and approaches for teaching socioscientific and controversial issues". In: *Journal of Science Teacher Education* 29.4, S. 283–306.

Borowski, Andreas et al. (2010). „Professionswissen von Lehrkräften in den Naturwissenschaften (ProwiN) – Kurzdarstellung des BMBF-Projekts". In: *ZfDN* 16, S. 341–348.

Brante, Thomas und Aant Elzinga (1990). „Towards a theory of scientific controversies". In: *Science studies* 2, S. 33–46.

Brehme, Robert W. (1968). „The Advantage of Teaching Relativity with Four-Vectors". In: *American Journal of Physics* 36.10, S. 896–901.

Brewer, William F. und Bruce L. Lambert (2001). „The Theory-Ladenness of Observation and the Theory-Ladenness of the Rest of the Scientific Process". In: *Philosophy of Science* 68.3, S. 176–186.

Brovelli, Dorothee et al. (2013). „Erfassen professioneller Kompetenzen für den naturwissenschaftlichen Unterricht: Ein Vignettentest mit authentisch komplexen Unterrichtssituationen und offenem Antwortformat". In: *Unterrichtswissenschaft* 41 (4), S. 306–329.

Camicia, Steven P. (2008). „Deciding What Is a Controversial Issue: A Case Study of Social Studies Curriculum Controversy". In: *Theory & Research in Social Education* 36.4, S. 298–316.

Carter, B. Elijah und Jason R. Wiles (2014). „Scientific consensus and social controversy: exploring relationships between students' conceptions of the nature of science, biological evolution, and global climate change". In: *Evolution: Education and Outreach* 7.6. URL: http://www.evolution-outreach.com/content/7/1/6ï¿¡ (besucht am 25. 08. 2020).

Cross, Roger T. und Ronald F. Price (1996). „Science Teachers' Social Conscience and the Role of Controversial Issues in the Teaching of Science". In: *Journal of Research in Science Teaching* 33.3, S. 319–333.

Dagher, Zoubeida R. und Sibel Erduran (2016). „Reconceptualizing the Nature of Science for Science Education." In: *Science & Education* 25, 147–164.

Dascal, Marcelo (2006). „Die Dialektik in der kollektiven Konstruktion wissenschaftlichen Wissens". In: *Kontroversen als Schlüssel zur Wissenschaft? Wissenskulturen in sprachlicher Interaktion*. Hrsg. von Wolf-Andreas Liebert und Marc-Denis Weitze. Bielefeld: transcript Verlag, S. 19–38.

Davis, Tamara (2019). „An expanding controversy". In: *Science* 365 (6458), S. 1076–1077.

Dearden, R. F. (1981). „Controversial Issues and the Curriculum". In: *Journal Of Curriculum Studies* 13.1, S. 37–44.

Demtröder, Wolfgang (2017). *Experimentalphysik. 4. Kern-, Teilchen- und Astrophysik*. 5. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.

Diehl, Bardo et al. (2012). *Physik Oberstufe. Qualifikationsphase*. 1. Auflage. Berlin: Cornelsen.

Dillon, Justin, Marcus Grace und Chris Oulton (2004). „Some critical reflections on the teaching of controversial issues in science education“. In: *The Development Education Journal* 10.3, S. 3–6.

Dorfmüller, T., W. T. Hering und K. Stierstadt (1998). *Bergmann, Schaefer: Lehrbuch der Experimentalphysik. Band 1: Mechanik, Relativität, Wärme*. 11. völlig neubearbeitete Auflage. Berlin, New York: de Gruyter.

Driver, R. et al. (1996). *Young People's Images of Science*. Buckingham, Philadelphia: Open University Press.

Dunlop, Lynda und Fernanda Veneu (2019). „Controversies in Science. To Teach or Not to Teach?“ In: *Science & Education* 28, 689–710.

Ebert, Bernd et al. (1995). *Physik. Sekundarstufe 2. Gesamtband*. 1. Auflage. Berlin: Volk und Wissen.

Eggert, Sabina und Susanne Bögeholz (2006). „Göttinger Modell der Bewertungskompetenz –Teilkompetenz „Bewerten, Entscheiden und Reflektieren“ für Gestaltungsaufgaben Nachhaltiger Entwicklung“. In: *ZfDN* 12, S. 177–197.

Eilks, Ingo, Ralf Marks und Mareike Burmeister (2012). „Über gefilterte Informationen lernen“. In: *Konzepte fachdidaktischer Strukturierung für den Unterricht. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung in Oldenburg 2011*. Hrsg. von Sascha Bernholt. Berlin: Lit Verlag, S. 364–366.

Einstein, Albert (2002). *Grundzüge der Relativitätstheorie*. 6. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Tokio: Springer.

Embacher, Franz (2010). *Elemente der theoretischen Physik. Band 1: Klassische Mechanik und Spezielle Relativitätstheorie. Eine Einführung für das Lehramts- und Bachelorstudium*. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

Erduran, Sibel und Zoubeida R. Dagher (2014). *Reconceptualizing the nature of science for science education: Scientific knowledge, practices and other family categories.* Dordrecht: Springer.

Fischer, Hans Ernst (1998). „Scientific Literacy und Physiklernen“. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 4 (2), S. 41–52.

Fließbach, Torsten (2018). *Die relativistische Masse*. Berlin: Springer Spektrum.

Forshaw, Jeffrey R. und A. Gavin Smith (2009). *Dynamics and Relativity*. Chichester: WILEY.

Freedman, Wendy (2017). „Cosmology at a crossroads“. In: *Nature Astronomy* 1. 121.

Freedman, Wendy L. et al. (2019). „The Carnegie-Chicago Hubble Program. VIII. An Independent Determination of the Hubble Constant Based on the Tip of the Red Giant Branch“. In: *The Astrophysical Journal* 882, S. 34–62.

Freudenthal, Gideon (2000). „A Rational Controversy over Compounding Forces“. In: *Scientific Controversies: Philosophical and Historical Perspectives*. Hrsg. von Peter Machamer, Marcello Pera und Aristides Baltas. Oxford: Oxford University Press, S. 125–142.

Freund, Jürgen (2007). *Spezielle Relativitätstheorie für Studienanfänger*. Zürich: vdf Hochschulverlag.

Garritz, Andoni (2013). „Teaching the Philosophical Interpretations of Quantum Mechanics and Quantum Chemistry Through Controversies“. In: *Science & Education* 22, 1787–1807.

Gebhard, Ulrich, Dietmar Höttecke und Markus Rehm (2017). *Pädagogik der Naturwissenschaften. Ein Studienbuch*. Wiesbaden: Springer VS, S. 65–84.

Giancoli, Douglas C. (2010). *Physik. Lehr- und Übungsbuch*. 3. aktualisierte Auflage. München: Pearson Studium.

Girwidz, Rainer und A. Müller (2016). „Unser Universum - ein Blick über den Horizont hinaus. Aktuelle astronomische Inhalte und Fachmethoden als Thema des Physikunterrichts“. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 27 (155), S. 2–7.

Günther, Helmut (2009). *Starthilfe Relativitätstheorie. Ein neuer Einstieg in Einsteins Welt*. 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner.

Goenner, Hubert (2004). *Spezielle Relativitätstheorie und die klassische Feldtheorie*. 1. Auflage. München: Elsevier.

Grehn, Joachim und Joachim Krause, Hrsg. (2007). *Metzler Physik SII*. 4. Auflage. Braunschweig: Schroedel.

Greiner, Walter und Johann Rafelski (1992). *Spezielle Relativitätstheorie. Ein Lehr- und Übungsbuch für Anfangssemester*. 3. überarbeitete Auflage. Theoretische Physik. Band 3 A. Frankfurt am Main: Verlag Harri Deutsch.

Griffiths, David (1996). *Einführung in die Elementarteilchenphysik*. Berlin: Akademie Verlag.

Guerra-Ramos, Maria Teresa (2012). „Teachers’ Ideas About the Nature of Science: A Critical Analysis of Research Approaches and Their Contribution to Pedagogical Practice“. In: *Science & Education* 21, S. 631–655.

Guerra-Ramos, Maria Teresa, Jim Ryder und John Leach (2010). „Ideas About the Nature of Science in Pedagogically Relevant Contexts: Insights From a Situated Perspective of Primary Teachers’ Knowledge“. In: *Science Education* 94, S. 282–307.

Halliday, D., R. Resnick und J. Walker (2009). *Halliday Physik*. 2. überarbeitete und ergänzte Auflage. Weinheim: WILEY-VCH.

Hammann, Marcus und Janina Jördens (2014). „Offene Aufgaben codieren“. In: *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Hrsg. von Dirk Krüger, Ilka Parchmann und Horst Schecker. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, S. 169–178.

Harris, Randy (2013). *Moderne Physik. Lehr- und Übungsbuch*. 2. aktualisierte Auflage. München: Pearson.

Hecht, Eugene (2009a). „Einstein Never Approved of Relativistic Mass“. In: *The Physics Teacher* 47, S. 336–341.

– (2009b). „Einstein on mass and energy“. In: *American Journal of Physics* 77.9, S. 799–806.

– (2011a). „How Einstein confirmed $E_0 = mc^2$“. In: *American Journal of Physics* 79.6, S. 591–600.

– (2011b). „On Defining Mass“. In: *The Physics Teacher* 49, S. 40–44.

Hedtke, Reinhold (2002). „Die Kontroversität in der Wirtschaftsdidaktik“. In: *Gesellschaft, Wirtschaft, Politik (Gegenwartskunde, Neue Folge)* 51, S. 173–186.

Heering, Peter und Kerstin Kremer (2018). „Nature of Science“. In: *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Hrsg. von Dirk Krüger, Ilka Parchmann und Horst Schecker. Berlin: Springer Spektrum, S. 105–119.

Heinicke, Susann (2014). „Experimentieren geht nicht ohne (Mess-)Unsicherheiten. Vorschläge zum unterrichtlichen Umgang mit Messungenauigkeiten“. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 25 (144). Hrsg. von Susann Heinicke und Rita Wodzinski, S. 29–31.

Heitmann, Patricia und Rüdiger Tiemann (2011). „Aspekte von Bewertungskompetenz im naturwissenschaftlichen Unterricht. Die Qual der Wahl zwischen Käse und Analogkäse“. In: *CHEMKON* 18.3, S. 129–133.

Henke, Andreas (2016). „Lernen über die Natur der Naturwissenschaften – Forschender und historisch orientierter Physikunterricht im Vergleich“. In: *ZfDN* 22, S. 123–145.

Herzig, Peter K. (2019). *Die Neue Relativitätstheorie. Das Ende aller Diskussionen.* Haag + Herchen.

Hessisches Kultusministerium (Hrsg.) (o. D.). *Kerncurriculum gymnasiale Oberstufe. Physik*. Wiesbaden.

Holbrook, Jack und Miia Rannikmae (2009). „The Meaning of Scientific Literacy“. In: *International Journal of Environmental & Science Education* 4.3, S. 275–288.

Hostenbach, Julia et al. (2011). „Modellierung der Bewertungskompetenz in den Naturwissenschaften zur Evaluation der Nationalen Bildungsstandards“. In: *ZfDN* 17, S. 261–287.

Hoyer, Jürgen und Samia Chaker (2009). „Kognitionsdiagnostik“. In: *Lehrbuch der Verhaltenstherapie. Band 1: Grundlagen, Diagnostik, Verfahren, Rahmenbedingungen*. Hrsg. von Jürgen Margraf und Silvia Schneider. 3., vollständig bearbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg: Springer Medizin Verlag, S. 391–407.

Härtig, Hendrik, Alexander Kauertz und Hans Ernst Fischer (2012). „Das Schulbuch im Physikunterricht. Nutzung von Schulbüchern zur Unterrichtsvorbereitung in Physik“. In: *Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht* 65.4, S. 197–200.

Höttecke, Dietmar (2001). „Die Vorstellungen von Schülern und Schülerinnen von der "Natur der Naturwissenschaften"“. In: *ZfDN* 7, S. 7–23.

– (2010). „Historisch orientierter Physikunterricht“. In: *Physik Methodik. Handbuch für die Sekundarstufe I und II*. Hrsg. von Silke Mikelskis-Seifert und Thorid Rabe. 2. Auflage. Berlin: Cornelsen Scriptor, S. 57–69.

– (2013). „Bewerten - Urteilen - Entscheiden. Ein Kompetenzbereich des Physikunterrichts“. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 23 (134), S. 4–12.

Höttecke, Dietmar und Martin Hopf (2018). „Schülervorstellungen zur Natur der Naturwissenschaften“. In: *Schülervorstellungen und Physikunterricht*. Hrsg. von Horst Schecker et al. Berlin: Springer Spektrum, S. 271–287.

Höttecke, Dietmar und Maria Mrochen (2010). „Bewerten Lernen im Treibhaus“. In: *Praxis der Naturwissenschaften* 59 (2). Hrsg. von Hartmut Wiesner, S. 26–35.

Höttecke, Dietmar und Falk Rieß (2007). „Rekonstruktion der Vorstellungen von Physikstudierenden über die Natur der Naturwissenschaften – eine explorative Studie“. In: *PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 6.1, S. 1–14.

Huang, Caroline D. et al. (2020). „Hubble Space Telescope Observations of Mira Variables in the SN Ia Host NGC 1559: An Alternative Candle to Measure the Hubble Constant“. In: *The Astrophysical Journal* 889.1, S. 5–19.

Inverno, Ray d’ (2009). *Einführung in die Relativitätstheorie*. 2. durchgesehene und korrigierte Auflage. Weinheim: WILEY-VCH.

Jammer, Max (2000). *Concepts of Mass in Contemporary Physics and Philosophy*. Princeton: Princeton University Press.

Jee, Inh et al. (2019). „A measurement of the Hubble constant from angular diameter distances to two gravitational lenses“. In: *Science* 365 (6458), S. 1134–1138.

Jupe, Klaus, Margit Ludwig und Helga Knopf (1995). *Spezielle Relativitätstheorie, Atomphysik (Kursthemen Physik)*. Frankfurt am Main: Diesterweg.

Justi, Rosária und Paula Cristina Cardoso Mendonca (2016). „Discussion of the Controversy Concerning a Historical Event Among Pre-service Teachers“. In: *Science & Education* 25, 795–822.

Kardash, Carol Anne M. und Roberta J. Scholes (1996). „Effects of Preexisting Beliefs, Epistemological Beliefs, and Need for Cognition on Interpretation of Controversial Issues“. In: *Journal of Educational Psychology* 88.2, S. 260–271.

Kelle, Udo und Susann Kluge (2010). *Vom Einzelfall zum Typus. Fallvergleich und Fallkontrastierung in der qualitativen Sozialforschung*. 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: VS Verlag.

Kenworthy, W. D’Arcy, Dan Scolnic und Adam Riess (2019). „The Local Perspective on the Hubble Tension: Local Structure Does Not Impact Measurement of the Hubble Constant“. In: *The Astrophysical Journal* 875, S. 145–154.

Kerr, David et al. (2015). *Leben mit Widersprüchen. Das Unterrichten kontroverser Themen im Rahmen der Politischen Bildung und Menschenrechtsbildung (EDC/HRE). Fortbildung für Lehrkräfte*. Hrsg. von David Kerr und Ted Huddleston. Europarat.

Khishfe, Rola und Norman Lederman (2006). „Teaching Nature of Science within a Controversial Topic: Integrated versus Nonintegrated“. In: *Journal of Research in Science Teaching* 43.4, S. 395–418.

Khrapko, Radii I. (2000). „What is mass?“ In: *Physics-Uspekhi* 43.12, S. 1267–1270.

Kipnis, Nahum (2001). „Scientific Controversies in Teaching Science: The Case of Volta“. In: *Science & Education* 10, 33–49.

Kircher, Ernst (2015). „Elementarisierung und didaktische Rekonstruktion“. In: *Physikdidaktik. Theorie und Praxis*. Hrsg. von Ernst Kircher, Raimund Girwidz und Peter Häußler. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.

Kitcher, Philip (2000). „Patterns of Scientific Controversies“. In: *Scientific Controversies: Philosophical and Historical Perspectives*. Hrsg. von Peter Machamer, Marcello Pera und Aristides Baltas. Oxford: Oxford University Press, S. 21–39.

KMK (2005). *Beschlüsse der Kultusministerkonferenz. Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss (Jahrgangsstufe 10)*. Hrsg. von Sekretariat der Ständigen Konferenz der Kultusminister der Länder in der Bundesrepublik Deutschland. München: Luchterhand.

– (2020). *Bildungsstandards im Fach Physik für die Allgemeine Hochschulreife*. Hrsg. von Sekretariat der Kultusministerkonferenz. Berlin, Bonn.

Kneubil, Fabiana B. (2018). „The meaning of mass and $E = mc^2$: an approach based on conceptual maps“. In: *Revista Brasileira de Ensino de Fisica* 40.4, (e4305)1–16.

Knittel, Corinne und Silke Mikelskis-Seifert (2013). „Lohnt sich eine Photovoltaikanlage auf dem Dach? Einbettung eines expliziten Bewertungstrainings in den Elektrizitätsunterricht der Sekundarstufe I“. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 23 (134). Hrsg. von Dietmar Höttecke und Rita Wodzinski, S. 22–26.

Kobel, Michael et al. (2018). *Teilchenphysik. Unterrichtsmaterial ab Klasse 10*. Hrsg. von Joachim Herz Stiftung. 1. Auflage.

Kolbenstvedt, Hans und Reidar Stølevik (1991). „The Concepts of Mass and Energy“. In: *Journal of Chemical Education* 68, S. 826–828.

Korte, Stefan (2015). *Die Grenzen der Naturwissenschaft als Thema des Physikunterrichts*. Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 194. Berlin: Logos Verlag.

Kraus, Martin Ernst (2008). „Argumentationsanlässe im Unterricht. Hinweise und Anregungen zum Einsatz von Cartoons und Teilargumentationen“. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 19 (107). Hrsg. von Martin Ernst Kraus, S. 8–10.

Kremer, Kerstin und Jürgen Mayer (2013). „Entwicklung und Stabilität von Vorstellungen über die Natur der Naturwissenschaften“. In: *Zeitschrift für Didaktik der Naturwissenschaften* 19, S. 77–101.

Kuckartz, Udo (2010a). *Einführung in die computergestützte Analyse qualitativer Daten*. 3., aktualisierte Auflage. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften.

– (2010b). „Typenbildung“. In: *Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie*. Hrsg. von Günter Mey und Katja Mruck. 1. Auflage. Wiesbaden: VS Verlag, S. 553–568.

– (2016). *Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung*. 3., überarbeitete Auflage. Weinheim: Beltz Juventa.

Kulgemeyer, Christoph (2010). „Physikalische Kommunikationskompetenz überprüfen. Orientierung und Beispielaufgaben zur Beurteilung von Kommunikationskompetenzen auf der Basis eines Modells physikalischer Kommunikation“. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 21 (116). Hrsg. von Michael Sach und Rita Wodzinski, S. 9–13.

Lederman, Norman G. (1999). „Teachers’ understanding of the nature of science and classroom practice: Factors that facilitate or impede the relationship“. In: *Journal of Research in Science Teaching* 36.8, S. 916–929.

– (2007). „Nature of Science: Past, Present, and Future“. In: *Handbook of research on science education*. Hrsg. von Sandra K. Abell und Norman G. Lederman. Mahwah: Lawrence Erlbaum, S. 831–880.

Lederman, Norman G. et al. (2002). „Views of Nature of Science Questionnaire: Toward Valid and Meaningful Assessment of Learners’ Conceptions of Nature of Science“. In: *Journal of Research in Science Teaching* 39.6, S. 497–521.

Leong, Wong Chee und Yap Kueh Chin (2005). „Conceptual Development of Einstein‘s Mass-Energy Relationship“. In: *New Horizons in Education* 51, S. 56–66.

Leuders, Timo et al. (2019). „Fachbezogene Pädagogische Kompetenzen und Wissenschaftsverständnis – Pädagogische Professionalität in Mathematik und Naturwissenschaften“. In: *Pädagogische Professionalität in Mathematik und Naturwissenschaften*. Hrsg. von Timo Leuders et al. Springer Spektrum, S. 3–38.

Levinson, Ralph (2006). „Towards a Theoretical Framework for Teaching Controversial Socio-scientific Issues“. In: *International Journal of Science Education* 28.10, S. 1201–1224.

Liebert, Wolf-Andreas (2006). „Ein Mehrebenenmodell für naturwissenschaftliche Kontroversen“. In: *Kontroversen als Schlüssel zur Wissenschaft? Wissenskulturen in sprachlicher Interaktion*. Hrsg. von Wolf-Andreas Liebert und Marc-Denis Weitze. Bielefeld: transcript Verlag, S. 129–147.

Machamer, Peter, Marcello Pera und Aristides Baltas (2000). „Scientific Controversies: An Introduction“. In: *Scientific Controversies: Philosophical and Historical Perspectives*. Hrsg. von Peter Machamer, Marcello Pera und Aristides Baltas. Oxford: Oxford University Press, S. 3–17.

Mamiani, Maurizio (2000). „The Structure of a Scientific Controversy: Hooke versus Newton about Colors“. In: *Scientific Controversies: Philosophical and Historical Perspectives*. Hrsg. von Peter Machamer, Marcello Pera und Aristides Baltas. Oxford: Oxford University Press, S. 143–152.

Manor, Eli Peter (2015). „Gravity, Not Mass Increases with Velocity“. In: *Journal of Modern Physics* 6, S. 1407–1411.

Manzel, Sabine (2017). „Erfüllt das Kontroversitätsprinzip Merkmale einer politikdidaktischen Theorie?“ In: *Politikwissenschaft und Politikdidaktik. Theorie und Empirie*. Hrsg. von Monika Oberle und Georg Weißeno. Wiesbaden: Springer VS, S. 31–43.

Marks, Ralf, Marc Stuckey und Ingo Eilks (2014). „Die gesellschaftliche Dimension naturwissenschaftlich-technischer Sachfragen. Die Perspektive der naturwissenschaftlichen Unterrichtsfächer“. In: *GW-Unterricht* 134, 19–28.

Mason, Lucia und Pietro Boscolo (2004). „Role of epistemological understanding and interest in interpreting a controversy and in topic-specific belief change“. In: *Contemporary Educational Psychology* 29, S. 103–128.

McComas, William F. und Joanne K. Olson (1998). „The nature of science in international science education standards documents“. In: *Nature of science in science education: rationales and strategies*. Hrsg. von William F. McComas. Kluwer (Springer) Academic Publishers, S. 41–52.

McMullin, Ernan (1987). „Scientific controversy and its termination“. In: *Scientific controversies: case studies in the resolution and closure of disputes in science andtechnology*. Hrsg. von H. T. Engelhardt Jr. Hrsg. von H. T. Engelhardt. Hrsg. von A. L.Caplan. Cambridge: Cambridge University Press, S. 49–92.

Meinel, Reinhard (2016). *Spezielle und allgemeine Relativitätstheorie für Bachelorstudenten*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.

Meschede (Hrsg.), Dieter (2010). *Gerthsen Physik*. 24. überarbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer.

Meyer, Lothar und Gerd-Dietrich Schmidt, Hrsg. (2016). *Physik. Gymnasiale Oberstufe*. 2. vollständig überarbeitete Ausgabe. Berlin, Mannheim: Duden Schulbuchverlag.

Millette, Pierre A. (2017). „On Time Dilation, Space Contraction, and the Question of Relativistic Masss“. In: *Progress in Physics* 13 (4), S. 202–205.

Ministerium für Bildung und Kultur Saarland (Hrsg.) (2019). *Lehrplan Physik. Gymnasiale Oberstufe. Grundkurs. Hauptphase. Erprobungsphase*.

Ministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Kultur des Landes Schleswig Holstein (Hrsg.) (2002). *Lehrplan für die Sekundarstufe II. Gymnasium, Gesamtschule. Physik*. Kiel.

Ministerium für Schule und Weiterbildung des Landes Nordrhein-Westfalen (Hrsg.) (2014). *Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen. Physik*. 1. Auflage. Düsseldorf.

Mittelstaedt, Peter (2013). *Rational Reconstructions of Modern Physics*. Second Enlarged Edition. Dordrecht, Heidelberg, New York, London: Springer.

Mummendey, Hans Dieter und Ina Grau (2014). *Die Fragebogen-Methode. Grundlagen und Anwendung in Persönlichkeits-, Einstellungs- und Selbstkonzeptforschung*. 6., korrigierte Auflage. Göttingen: Hogrefe.

Nehrdich, Tobias (2011). „Kontroversität. Neue Herausforderungen für eine aktuelle Geographiedidaktik.“ In: *GW-Unterricht* 124, S. 15–25.

Neumann, Irene und Kerstin Kremer (2013). „Nature of Science und epistemologische Überzeugungen – Ähnlichkeiten und Unterschiede“. In: *ZfDN* 19, S. 209–232.

Niaz, Mansoor (2009). „Progressive transitions in chemistry teachers’ understanding of nature of science based on historical controversies“. In: *Science & Education* 18, S. 43–65.

Niaz, Mansoor und María A Rodríguez (2002). „Improving learning by discussing controversies in 20th century physics“. In: *Physics Education* 37, S. 59–63.

Niendorf, Mareike und Sandra Reitz (2019). „Schweigen ist nicht neutral: menschenrechtliche Anforderungen an Neutralität und Kontroversität in der Schule“. In: *Information/Deutsches Institut für Menschenrechte* 25, S. 1–7. URL: `https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-62785-2`.

Ünlü Yavaş, Pervin und Hasan Şahin Kizilcik (2016). „Pre-Service Physics Teachers‘s Difficulties in Understanding Special Relativity Topics“. In: *European Journal of Physics Education* 7 (1), S. 13–24.

Nolting, Wolfgang (2016). *Grundkurs Theoretische Physik 4/1. Spezielle Relativitätstheorie*. 9. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.

Nott, Mick und Jerry Wellington (1996). „When the black box springs open: practical work in schools and the nature of science“. In: *International Journal of Science Education* 18.7, S. 807–818.

– (1998a). „A Programm of Developing Understanding of the Nature of Science in Teacher Eucation“. In: *The Nature of Science in Science Education*. Hrsg. von W. F. McComas. New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow: Kluwer Academic Publishers, S. 293–313.

– (1998b). „Eliciting, Interpreting and Developing Teachers’ Understandings of the Nature of Science“. In: *Science & Education* 7, S. 579–594.

Oas, Gary (2008). „On the abuse and use of relativistic mass“. In: *arXiv*, S. 1–11.

Ogborn, Jon (2005). „Introducing relativity: less may be more“. In: *Physics Education* 40.3, S. 213–222.

Ohl, Ulrike (2013). „Komplexität und Kontroversität“. In: *Praxis Geographie* 3, S. 4–8.

Okun, Lev B. (1987). *α, β, γ, ... Z. A Primer in Particle Physics*. Chur: Harwood Academic Publishers.

– (1989a). „The Concept of Mass“. In: *Physics Today* 42.6, S. 31–36.

– (1989b). „Tho concept of mass (mass, energy, relativity)“. In: *Soviet Physics Uspekhi* 32.7, S. 629–638.

– (1998). „Note on the meaning and terminology of Special Relativity“. In: *European Journal of Physics* 19.4, S. 403–406.

– (2000). „Reply to the letter „Whats is mass?“ by R. I. Khrapko“. In: *Physics-Uspekhi* 43.12, S. 1270–1275.

– (2005). „Mass, energy and the meaning of relativity“. In: *Physics World* 18.10, S. 20.
– (2006). „Formula $E = mc^2$ in the Year of Physics“. In: *Acta Physica Polonica B* 37.4, S. 1327–1332.
– (2008). „The Einstein formula: $E_0 = mc^2$. „Isn‘t the Lord laughing?““ In: *Physics-Uspekhi* 51.1, S. 513–527.
– (2009). „Mass versus relativistic and rest masses“. In: *American Journal of Physics* 77.5, S. 430–431.
Osborne, Jonathan et al. (2003). „What “Ideas-about-Science” Should Be Taught in School Science? A Delphi Study of the Expert Community“. In: *Journal of Research in Science Teaching* 40.7, S. 692–720.
Oulton, Chris, Justin Dillon und Marcus M. Grace (2004). „Reconceptualizing the teaching of controversial issues“. In: *International Journal of Science Education* 26.4, 411–423.
Oulton, Christopher et al. (2004). „Controversial issues - teachers’ attitudes and practices in the context of citizenship education“. In: *Oxford Review of Education* 30.4, S. 489–507.
Petkov, Vesselin (2009). *Relativity and the nature of spacetime*. Second Edition. Dordrecht, Heidelberg, London, New York: Springer.
Priemer, Burkhard (2006). „Deutschsprachige Verfahren der Erfassung von epistemologischen Überzeugungen“. In: *ZfDN* 12, S. 159–175.
Rabe, Thorid, Claudia Meinhardt und Olaf Krey (2012). „Entwicklung eines Instruments zur Erhebung von Selbstwirksamkeitserwartungen in physikdidaktischen Handlungsfeldern“. In: *ZfDN* 18, S. 293–314.
Rafelski, Johann (2019). *Spezielle Relativitätstheorie heute. Schlüssig erklärt mit Beispielen, Aufgaben und Diskussionen*. Berlin: Springer Spektrum.
Rafolt, Susanne, Suzanne Kapelari und Kerstin Kremer (2019). „Kritisches Denken im naturwissenschaftlichen Unterricht – Synergiemodell, Problemlage und Desiderata“. In: *ZfDN* 25, 63–75.
Rädiker, Stefan und Udo Kuckartz (2019). *Analyse qualitativer Datenmit MAXQDA. Text, Audio und Video*. Wiesbaden: Springer VS.
Rehm, Markus und Katrin Bölsterli (2014). „Entwicklung von Unterrichtsvignetten“. In: *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Hrsg. von Dirk Krüger, Ilka Parchmann und Horst Schecker. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, S. 213–226.
Reis, Pedro und Cecília Galvão (2004). „Socio-scientific controversies and students’ conceptions about scientists“. In: *International Journal of Science Education* 26.13, S. 1621–1633.
Riese, Josef (2009). *Professionelles Wissen und professionelle Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften*. Studien zum Physik- und Chemielernen, Band 97. Berlin: Logos Verlag.
Riese, Josef und Peter Reinhold (2010). „Empirische Erkenntnisse zur Struktur professioneller Handlungskompetenz von angehenden Physiklehrkräften“. In: *ZfDN* 16, S. 167–187.
Riess, Adam G. et al. (2016). „A 2.4% determination of the local value of the hubble constant“. In: *The Astrophysical Journal* 826, S. 56–86.
Rindler, Wolfgang (1990). „Putting to Rest Mass Misconceptions“. In: *Physics Today* 43.5, S. 13–14.

Rindler, Wolfgang (2006). *Relativity. Special, General and Cosmological*. Second Edition. Oxford, New York: Oxford University Press.

Roche, John (2005). „What is mass?“ In: *European Journal of Physics* 26, S. 225–242.

Sachsen-Anhalt, Ministerium für Bildung (Hrsg.) (2019). *Fachlehrplan Gymnasium. Physik*.

Sadler, Troy D., F. William Chambers und Dana L. Zeidler (2004). „Student conceptualizations of the nature of science in response to a socioscientific issue“. In: *International Journal of Science Education* 26.4, S. 387–409.

Sander, Hannes und Dietmar Höttecke (2014). „Vignetten zur qualitativen Untersuchung von Urteilsprozessen bei SchülerInnen“. In: *PhyDid B-Didaktik der Physik-Beiträge zur DPG-Frühjahrstagung*, S. 1–7.

Sandin, T. R. (1991). „In defense of relativistic mass“. In: *American Journal of Physics* 59.11, S. 1032–1036.

Sandmann, Angela (2014). „Lautes Denken - die Analyse von Denk-, Lern- und Problemlöseprozessen“. In: *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Hrsg. von Dirk Krüger, Ilka Parchmann und Horst Schecker. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, S. 179–188.

Schecker, Horst, Ilka Parchmann und Dirk Krüger (2018). „Theoretische Rahmung naturwissenschaftsdidaktischer Forschung“. In: *Theorien in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Hrsg. von Dirk Krüger, Ilka Parchmann und Horst Schecker. Berlin: Springer, S. 1–9.

Schindler, Kirsten, Katrin Lehnen und Eva-Maria Jakobs (2006). „Konzeptualisierung von Wissenschaft und Kontroverse bei Schülern und Studierenden“. In: *Kontroversen als Schlüssel zur Wissenschaft? Wissenskulturen in sprachlicher Interaktion*. Hrsg. von Wolf-Andreas Liebert und Marc-Denis Weitze. Bielefeld: transcript Verlag, S. 81–94.

Schnurr, Stefan (2003). „Vignetten in quantitativen und qualitativen Forschungsdesigns“. In: *Empirische Forschung und Soziale Arbeit. Ein Lehr- und Arbeitsbuch*. Hrsg. von Hans-Uwe Otto, Gertrud Oelerich und Heinz-Günter Micheel. München: Luchterhand, S. 393–400.

Schommer, Marlene (1990). „Effects of Beliefs About the Nature of Knowledge on Comprehension“. In: *Journal of Educational Psychology* 82.3, S. 498–504.

Schreier, Margrit (2010). „Fallauswahl“. In: *Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie*. Hrsg. von Günter Mey und Katja Mruck. 1. Auflage. Wiesbaden: VS Verlag, S. 238–251.

Sächsisches Staatsministerium für Kultus (Hrsg.) (o. D.). *Lehrplan Gymnasium. Physik. 2004, 2007, 2009, 2011, 2019*. Dresden.

Schüssele, Bernd, Elmar Stahl und Silke Mikelskis-Seifert (2019). „Entwicklung und Evaluation eines Instruments zur Erhebung des Wissenschaftsverständnisses in Physik“. In: *Pädagogische Professionalität in Mathematik und Naturwissenschaften*. Hrsg. von Timo Leuders et al. Springer Spektrum, S. 180–204.

Schulze Heuling, Lydia, Silke Mikelskis-Seifert und Matthias Nückles (2015). „Nature of Science aus Lehrerperspektive. Untersuchungen zum Wissenschaftsverständnis von Physiklehrkräften“. In: *ZfDN* 21, S. 41–53.

– (2019). „Zur Interdependenz von Wissenschaftsverständnissen und Unterrichtsmethoden anhand deutschsprachiger Physiklehrkräfte“. In: *Pädagogische Professionalität in Mathematik und Naturwissenschaften*. Hrsg. von Timo Leuders et al. Springer Spektrum, S. 151–180.

Schwartz, Reneé S. und Norman G. Lederman (2002). „Ït's the Nature of the Beast": The Influence of Knowledge and Intentions on Learning and Teaching Nature of Science“. In: *Journal of Research in Science Teaching* 39.3, S. 205–236.

Scott, Pam, Evelleen Richards und Brian Martin (1990). „Captives of Controversy: The Myth of the Neutral Social Researcher in Contemporary Scientific Controversies“. In: *Science, Technology & Human Values* 15.4, S. 474–494.

Selçuk, Gamze Sezgin (2011). „Adressing pre-service teachers‘s understandings and difficulties with some core concepts in the special theory of relativity“. In: *European Journal of Physics* 32, S. 1–13.

Senatorin für Bildung und Wissenschaft (Hrsg.) (2008). *Physik. Bildungsplan für die Gymnasiale Oberstufe. Qualifikationsphase.* Bremen.

Sieve, Bernhard und Sascha Schanze (2012). „Bewertung lernen im Chemieunterricht – aber wie? Eine Betrachtung aus der Lehrerperspektive“. In: *Konzepte fachdidaktischer Strukturierung für den Unterricht. Gesellschaft für Didaktik der Chemie und Physik. Jahrestagung in Oldenburg 2011*. Hrsg. von Sascha Bernholt. Berlin: Lit Verlag, S. 373–375.

Songer, N. B. und M. C. Linn (1991). „How do Student‘s Views of Science Influence Knowledge Integration“. In: *Journal of Research in Science Teaching* 28.9, S. 761–784.

Staatsinstitut für Schulqualität und Bildungsforschung München (Hrsg.) (o. D.). *Lehrplan für das Gymnasium in Bayern. Jahrgangsstufen 11/12. Physik*. URL: `http://www.gym8-lehrplan.bayern.de/contentserv/3.1.neu/g8.de/id_27147.html` (besucht am 11. 01. 2021).

Steinmetz, Matthias (2020). „Lückenlose Entstehungsgeschichte“. In: *Physik Journal* 19.8/9, S. 26–28.

Stradling, Robert (1984). „The Teaching of Controversial Issues: an evaluation“. In: *Educational Review* 36.2, S. 121–129.

Streit, Christine und Christof Weber (2013). „Vignetten zur Erhebung von handlungsnahem, mathematikspezifischem Wissen angehender Grundschullehrkräfte“. In: *Beiträge zum Mathematikunterricht 2013, Vorträge auf der 47. Tagung für Didaktik der Mathematik*. Hrsg. von G. Greefrath, F. Käpnick und M. Stein. Münster: WTM-Verlag, 986–989.

Strnad, J. (1991). „Velocity-dependent mass of proper time?“ In: *European Journal of Physics* 12, S. 69–73.

Taylor, Edwin F. und John Archibald Wheeler (1992). *Spacetime physics: introduction to special relativity*. Second Edition. New York: W. H. Freeman und Company.

Taylor, Joseph A. und Thomas M. Dana (2003). „Secondary School Physics Teachers' Conceptions of Scientific Evidence: An Exploratory Case Study“. In: *Journal of Research in Science Teaching* 40.8, S. 721–736.

Tepner, Oliver und Sabrina Dollny (2014). „Entwicklung eines Testverfahrens zur Analyse fachdidaktischen Wissens“. In: *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Hrsg. von Dirk Krüger, Ilka Parchmann und Horst Schecker. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, S. 311–324.

Tepner, Oliver et al. (2012). „Modell zur Entwicklung von Testitems zur Erfassung des Professionswissens von Lehrkräften in den Naturwissenschaften“. In: *ZfDN* 18, S. 7–28.

Thüringer Ministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur (Hrsg.) (2012). *Lehrplan für den Erwerb der allgemeinen Hochschulreife. Physik*. Erfurt.

Tipler, Paul A. und Ralph A. Llewellyn (2010). *Moderne Physik*. 2. Auflage. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.

Tipler, Paul A. und Gene Mosca (2015). *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. 7. deutsche Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.

Tsamparlis, M. (2010). *Special Relativity. An Introduction with 200 Problems and Solutions*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Ungar, Abraham A. (2011). „When relativistic mass meets hyperbolic geometry“. In: *Communications in Mathematical Analysis* 10.1, S. 30–56.

Upmeier zu Belzen, Annette und Ralf Merkel (2014). „Einsatz von Fällen in der Lehr-und Lernforschung“. In: *Methoden in der naturwissenschaftsdidaktischen Forschung*. Hrsg. von Dirk Krüger, Ilka Parchmann und Horst Schecker. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum, S. 203–212.

Urhahne, Detlef, Kerstin Kremer und Jürgen Mayer (2008). „Welches Verständnis haben Jugendliche von der Natur der Naturwissenschaften? Entwicklung und erste Schritte zur Validierung eines Fragebogens“. In: *Unterrichtswissenschaft* 36, S. 71–93.

Van Rooy, Wilhelmina (1993). „Teaching controversial issues in the secondary school science classroom“. In: *Research in Science Education* 23, S. 317–326.

Vasiliev, Sergey A. (2012). „On the Notion of the Measure of Inertia in the Special Relativity Theory“. In: *Applied Physics Research* 4.2, S. 136–143.

Venturini, Tommaso (2010). „Diving in magma: how to explore controversies with actor-network theory“. In: *Public Understanding of Science* 19.3, 258–273.

Wagner, Paul, Georg Reischl und Gerhard Steiner (2014). *Einführung in die Physik*. 3. erweiterte Auflage. Wien: Facultas Verlags- und Buchhandels AG.

Wazeck, Milena (2013). „Marginalization processes in science: the controversy about the theory of relativity in the 1920s“. In: *Social Studies of Science* 43.2, 163–190.

Weidl, Erhard (2010). *Mehr Erfolg in Physik. Relativitätstheorie, Quanten-, Atom- und Kernphysik*. München: Mentor-Verlag.

Weiss, Achim (2020). „Auch Sterne altern: Methoden zur Altersbestimmung im Kosmos“. In: *Physik in unserer Zeit* 51.2, S. 88–95.

Weitze, Marc-Denis (2006). „Kontroversen im Museum: Ideen und Probleme der Wissenschaftskommunikation“. In: *Kontroversen als Schlüssel zur Wissenschaft? Wissenskulturen in sprachlicher Interaktion*. Hrsg. von Wolf-Andreas Liebert und Marc-Denis Weitze. Bielefeld: transcript Verlag, S. 149–164.

Weitze, Marc-Denis und Wolf-Andreas Liebert (2006). „Kontroversen als Schlüssel zur Wissenschaft – Probleme, Ideen und künftige Forschungsfelder“. In: *Kontroversen als Schlüssel zur Wissenschaft? Wissenskulturen in sprachlicher Interaktion*. Hrsg. von Wolf-Andreas Liebert und Marc-Denis Weitze. Bielefeld: transcript Verlag, S. 7–18.

Whitaker, M. A. B. (1976). „Definitions of mass in special relativity“. In: *Physics Education* 11, S. 55–57.

Wodzinski, Rita (2013). „Bewertungskompetenz im Unterricht anbahnen. Ein Überblick über geeignete Methoden“. In: *Naturwissenschaften im Unterricht Physik* 23 (134). Hrsg. von Dietmar Höttecke und Rita Wodzinski, S. 13–16.

Woodhouse, Nicholas (2016). *Spezielle Relativitätstheorie*. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.

Zeidler, Dana L. et al. (2002). „Tangled up in views: Beliefs in the nature of science and responses to socio-scientific dilemmas“. In: *Science Education* 86, S. 343–367.

Zeidler, Dana L. et al. (2005). „Beyond STS: A research-based framework for socio-scientific issues education“. In: *Science Education* 89, 357–377.

Bisher erschienene Bände der Reihe *„Studien zum Physik- und Chemielernen“*

ISSN 1614-8967 (vormals *Studien zum Physiklernen* ISSN 1435-5280)

1 Helmut Fischler, Jochen Peuckert (Hrsg.): Concept Mapping in fachdidaktischen Forschungsprojekten der Physik und Chemie
ISBN 978-3-89722-256-4 40.50 EUR

2 Anja Schoster: Bedeutungsentwicklungsprozesse beim Lösen algorithmischer Physikaufgaben. *Eine Fallstudie zu Lernprozessen von Schülern im Physiknachhilfeunterricht während der Bearbeitung algorithmischer Physikaufgaben*
ISBN 978-3-89722-045-4 40.50 EUR

3 Claudia von Aufschnaiter: Bedeutungsentwicklungen, Interaktionen und situatives Erleben beim Bearbeiten physikalischer Aufgaben
ISBN 978-3-89722-143-7 40.50 EUR

4 Susanne Haeberlen: Lernprozesse im Unterricht mit Wasserstromkreisen. *Eine Fallstudie in der Sekundarstufe I*
ISBN 978-3-89722-172-7 40.50 EUR

5 Kerstin Haller: Über den Zusammenhang von Handlungen und Zielen. *Eine empirische Untersuchung zu Lernprozessen im physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-242-7 40.50 EUR

6 Michaela Horstendahl: Motivationale Orientierungen im Physikunterricht
ISBN 978-3-89722-227-4 50.00 EUR

7 Stefan Deylitz: Lernergebnisse in der Quanten-Atomphysik. *Evaluation des Bremer Unterrichtskonzepts*
ISBN 978-3-89722-291-5 40.50 EUR

8 Lorenz Hucke: Handlungsregulation und Wissenserwerb in traditionellen und computergestützten Experimenten des physikalischen Praktikums
ISBN 978-3-89722-316-5 50.00 EUR

9 Heike Theyßen: Ein Physikpraktikum für Studierende der Medizin. *Darstellung der Entwicklung und Evaluation eines adressatenspezifischen Praktikums nach dem Modell der Didaktischen Rekonstruktion*
ISBN 978-3-89722-334-9 40.50 EUR

10 Annette Schick: Der Einfluß von Interesse und anderen selbstbezogenen Kognitionen auf Handlungen im Physikunterricht. *Fallstudien zu Interessenhandlungen im Physikunterricht*
ISBN 978-3-89722-380-6 40.50 EUR

11 Roland Berger: Moderne bildgebende Verfahren der medizinischen Diagnostik. *Ein Weg zu interessanterem Physikunterricht*
ISBN 978-3-89722-445-2 40.50 EUR

12 Johannes Werner: Vom Licht zum Atom. *Ein Unterrichtskonzept zur Quantenphysik unter Nutzung des Zeigermodells*
ISBN 978-3-89722-471-1 40.50 EUR

13 Florian Sander: Verbindung von Theorie und Experiment im physikalischen Praktikum. *Eine empirische Untersuchung zum handlungsbezogenen Vorverständnis und dem Einsatz grafikorientierter Modellbildung im Praktikum*
ISBN 978-3-89722-482-7 40.50 EUR

14 Jörn Gerdes: Der Begriff der physikalischen Kompetenz. *Zur Validierung eines Konstruktes*
ISBN 978-3-89722-510-7 40.50 EUR

15 Malte Meyer-Arndt: Interaktionen im Physikpraktikum zwischen Studierenden und Betreuern. *Feldstudie zu Bedeutungsentwicklungsprozessen im physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-541-1 40.50 EUR

16 Dietmar Höttecke: Die Natur der Naturwissenschaften historisch verstehen. *Fachdidaktische und wissenschaftshistorische Untersuchungen*
ISBN 978-3-89722-607-4 40.50 EUR

17 Gil Gabriel Mavanga: Entwicklung und Evaluation eines experimentell- und phänomenorientierten Optikcurriculums. *Untersuchung zu Schülervorstellungen in der Sekundarstufe I in Mosambik und Deutschland*
ISBN 978-3-89722-721-7 40.50 EUR

18 Meike Ute Zastrow: Interaktive Experimentieranleitungen. *Entwicklung und Evaluation eines Konzeptes zur Vorbereitung auf das Experimentieren mit Messgeräten im Physikalischen Praktikum*
ISBN 978-3-89722-802-3 40.50 EUR

19 Gunnar Friege: Wissen und Problemlösen. *Eine empirische Untersuchung des wissenszentrierten Problemlösens im Gebiet der Elektrizitätslehre auf der Grundlage des Experten-Novizen-Vergleichs*
ISBN 978-3-89722-809-2 40.50 EUR

20 Erich Starauschek: Physikunterricht nach dem Karlsruher Physikkurs. *Ergebnisse einer Evaluationsstudie*
ISBN 978-3-89722-823-8 40.50 EUR

21 Roland Paatz: Charakteristika analogiebasierten Denkens. *Vergleich von Lernprozessen in Basis- und Zielbereich*
ISBN 978-3-89722-944-0 40.50 EUR

22 Silke Mikelskis-Seifert: Die Entwicklung von Metakonzepten zur Teilchenvorstellung bei Schülern. *Untersuchung eines Unterrichts über Modelle mithilfe eines Systems multipler Repräsentationsebenen*
ISBN 978-3-8325-0013-9 40.50 EUR

23 Brunhild Landwehr: Distanzen von Lehrkräften und Studierenden des Sachunterrichts zur Physik. *Eine qualitativ-empirische Studie zu den Ursachen*
ISBN 978-3-8325-0044-3 40.50 EUR

24 Lydia Murmann: Physiklernen zu Licht, Schatten und Sehen. *Eine phänomenografische Untersuchung in der Primarstufe*
ISBN 978-3-8325-0060-3 40.50 EUR

25 Thorsten Bell: Strukturprinzipien der Selbstregulation. *Komplexe Systeme, Elementarisierungen und Lernprozessstudien für den Unterricht der Sekundarstufe II*
ISBN 978-3-8325-0134-1 40.50 EUR

26 Rainer Müller: Quantenphysik in der Schule
ISBN 978-3-8325-0186-0 40.50 EUR

27 Jutta Roth: Bedeutungsentwicklungsprozesse von Physikerinnen und Physikern in den Dimensionen Komplexität, Zeit und Inhalt
ISBN 978-3-8325-0183-9 40.50 EUR

28 Andreas Saniter: Spezifika der Verhaltensmuster fortgeschrittener Studierender der Physik
ISBN 978-3-8325-0292-8 40.50 EUR

29 Thomas Weber: Kumulatives Lernen im Physikunterricht. *Eine vergleichende Untersuchung in Unterrichtsgängen zur geometrischen Optik*
ISBN 978-3-8325-0316-1 40.50 EUR

30 Markus Rehm: Über die Chancen und Grenzen moralischer Erziehung im naturwissenschaftlichen Unterricht
ISBN 978-3-8325-0368-0 40.50 EUR

31 Marion Budde: Lernwirkungen in der Quanten-Atom-Physik. *Fallstudien über Resonanzen zwischen Lernangeboten und SchülerInnen-Vorstellungen*
ISBN 978-3-8325-0483-0 40.50 EUR

32 Thomas Reyer: Oberflächenmerkmale und Tiefenstrukturen im Unterricht. *Exemplarische Analysen im Physikunterricht der gymnasialen Sekundarstufe*
ISBN 978-3-8325-0488-5 40.50 EUR

33 Christoph Thomas Müller: Subjektive Theorien und handlungsleitende Kognitionen von Lehrern als Determinanten schulischer Lehr-Lern-Prozesse im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-0543-1 40.50 EUR

34 Gabriela Jonas-Ahrend: Physiklehrervorstellungen zum Experiment im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-0576-9 40.50 EUR

35 Dimitrios Stavrou: Das Zusammenspiel von Zufall und Gesetzmäßigkeiten in der nichtlinearen Dynamik. *Didaktische Analyse und Lernprozesse*
ISBN 978-3-8325-0609-4 40.50 EUR

36 Katrin Engeln: Schülerlabors: authentische, aktivierende Lernumgebungen als Möglichkeit, Interesse an Naturwissenschaften und Technik zu wecken
ISBN 978-3-8325-0689-6 40.50 EUR

37 Susann Hartmann: Erklärungsvielfalt
ISBN 978-3-8325-0730-5 40.50 EUR

38 Knut Neumann: Didaktische Rekonstruktion eines physikalischen Praktikums für Physiker
ISBN 978-3-8325-0762-6 40.50 EUR

39 Michael Späth: Kontextbedingungen für Physikunterricht an der Hauptschule. *Möglichkeiten und Ansatzpunkte für einen fachübergreifenden, handlungsorientierten und berufsorientierten Unterricht*
ISBN 978-3-8325-0827-2 40.50 EUR

40 Jörg Hirsch: Interesse, Handlungen und situatives Erleben von Schülerinnen und Schülern beim Bearbeiten physikalischer Aufgaben
ISBN 978-3-8325-0875-3 40.50 EUR

41 Monika Hüther: Evaluation einer hypermedialen Lernumgebung zum Thema Gasgesetze. *Eine Studie im Rahmen des Physikpraktikums für Studierende der Medizin*
ISBN 978-3-8325-0911-8 40.50 EUR

42 Maike Tesch: Das Experiment im Physikunterricht. *Didaktische Konzepte und Ergebnisse einer Videostudie*
ISBN 978-3-8325-0975-0 40.50 EUR

43 Nina Nicolai: Skriptgeleitete Eltern-Kind-Interaktion bei Chemiehausaufgaben. *Eine Evaluationsstudie im Themenbereich Säure-Base*
ISBN 978-3-8325-1013-8 40.50 EUR

44 Antje Leisner: Entwicklung von Modellkompetenz im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-1020-6 40.50 EUR

45 Stefan Rumann: Evaluation einer Interventionsstudie zur Säure-Base-Thematik
ISBN 978-3-8325-1027-5 40.50 EUR

46 Thomas Wilhelm: Konzeption und Evaluation eines Kinematik/Dynamik-Lehrgangs zur Veränderung von Schülervorstellungen mit Hilfe dynamisch ikonischer Repräsentationen und graphischer Modellbildung – mit CD-ROM
ISBN 978-3-8325-1046-6 45.50 EUR

47 Andrea Maier-Richter: Computerunterstütztes Lernen mit Lösungsbeispielen in der Chemie. *Eine Evaluationsstudie im Themenbereich Löslichkeit*
ISBN 978-3-8325-1046-6 40.50 EUR

48 Jochen Peuckert: Stabilität und Ausprägung kognitiver Strukturen zum Atombegriff
ISBN 978-3-8325-1104-3 40.50 EUR

49 Maik Walpuski: Optimierung von experimenteller Kleingruppenarbeit durch Strukturierungshilfen und Feedback
ISBN 978-3-8325-1184-5 40.50 EUR

50 Helmut Fischler, Christiane S. Reiners (Hrsg.): Die Teilchenstruktur der Materie im Physik- und Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-1225-5 34.90 EUR

51 Claudia Eysel: Interdisziplinäres Lehren und Lernen in der Lehrerbildung. *Eine empirische Studie zum Kompetenzerwerb in einer komplexen Lernumgebung*
ISBN 978-3-8325-1238-5 40.50 EUR

52 Johannes Günther: Lehrerfortbildung über die Natur der Naturwissenschaften. *Studien über das Wissenschaftsverständnis von Grundschullehrkräften*
ISBN 978-3-8325-1287-3 40.50 EUR

53 Christoph Neugebauer: Lernen mit Simulationen und der Einfluss auf das Problemlösen in der Physik
ISBN 978-3-8325-1300-9 40.50 EUR

54 Andreas Schnirch: Gendergerechte Interessen- und Motivationsförderung im Kontext naturwissenschaftlicher Grundbildung. *Konzeption, Entwicklung und Evaluation einer multimedial unterstützten Lernumgebung*
ISBN 978-3-8325-1334-4 40.50 EUR

55 Hilde Köster: Freies Explorieren und Experimentieren. *Eine Untersuchung zur selbstbestimmten Gewinnung von Erfahrungen mit physikalischen Phänomenen im Sachunterricht*
ISBN 978-3-8325-1348-1 40.50 EUR

56 Eva Heran-Dörr: Entwicklung und Evaluation einer Lehrerfortbildung zur Förderung der physikdidaktischen Kompetenz von Sachunterrichtslehrkräften
ISBN 978-3-8325-1377-1 40.50 EUR

57 Agnes Szabone Varnai: Unterstützung des Problemlösens in Physik durch den Einsatz von Simulationen und die Vorgabe eines strukturierten Kooperationsformats
ISBN 978-3-8325-1403-7 40.50 EUR

58 Johannes Rethfeld: Aufgabenbasierte Lernprozesse in selbstorganisationsoffenem Unterricht der Sekundarstufe I zum Themengebiet ELEKTROSTATIK. *Eine Feldstudie in vier 10. Klassen zu einer kartenbasierten Lernumgebung mit Aufgaben aus der Elektrostatik*
ISBN 978-3-8325-1416-7 40.50 EUR

59 Christian Henke: Experimentell-naturwissenschaftliche Arbeitsweisen in der Oberstufe. *Untersuchung am Beispiel des HIGHSEA-Projekts in Bremerhaven*
ISBN 978-3-8325-1515-7 40.50 EUR

60 Lutz Kasper: Diskursiv-narrative Elemente für den Physikunterricht. *Entwicklung und Evaluation einer multimedialen Lernumgebung zum Erdmagnetismus*
ISBN 978-3-8325-1537-9 40.50 EUR

61 Thorid Rabe: Textgestaltung und Aufforderung zu Selbsterklärungen beim Physiklernen mit Multimedia
ISBN 978-3-8325-1539-3 40.50 EUR

62 Ina Glemnitz: Vertikale Vernetzung im Chemieunterricht. *Ein Vergleich von traditionellem Unterricht mit Unterricht nach Chemie im Kontext*
ISBN 978-3-8325-1628-4 40.50 EUR

63 Erik Einhaus: Schülerkompetenzen im Bereich Wärmelehre. *Entwicklung eines Testinstruments zur Überprüfung und Weiterentwicklung eines normativen Modells fachbezogener Kompetenzen*
ISBN 978-3-8325-1630-7 40.50 EUR

64 Jasmin Neuroth: Concept Mapping als Lernstrategie. *Eine Interventionsstudie zum Chemielernen aus Texten*
ISBN 978-3-8325-1659-8 40.50 EUR

65 Hans Gerd Hegeler-Burkhart: Zur Kommunikation von Hauptschülerinnen und Hauptschülern in einem handlungsorientierten und fächerübergreifenden Unterricht mit physikalischen und technischen Inhalten
ISBN 978-3-8325-1667-3 40.50 EUR

66 Karsten Rincke: Sprachentwicklung und Fachlernen im Mechanikunterricht. *Sprache und Kommunikation bei der Einführung in den Kraftbegriff*
ISBN 978-3-8325-1699-4 40.50 EUR

67 Nina Strehle: Das Ion im Chemieunterricht. *Alternative Schülervorstellungen und curriculare Konsequenzen*
ISBN 978-3-8325-1710-6 40.50 EUR

68 Martin Hopf: Problemorientierte Schülerexperimente
ISBN 978-3-8325-1711-3 40.50 EUR

69 Anne Beerenwinkel: Fostering conceptual change in chemistry classes using expository texts
ISBN 978-3-8325-1721-2 40.50 EUR

70 Roland Berger: Das Gruppenpuzzle im Physikunterricht der Sekundarstufe II. *Eine empirische Untersuchung auf der Grundlage der Selbstbestimmungstheorie der Motivation*
ISBN 978-3-8325-1732-8 40.50 EUR

71 Giuseppe Colicchia: Physikunterricht im Kontext von Medizin und Biologie. *Entwicklung und Erprobung von Unterrichtseinheiten*
ISBN 978-3-8325-1746-5 40.50 EUR

72 Sandra Winheller: Geschlechtsspezifische Auswirkungen der Lehrer-Schüler-Interaktion im Chemieanfangsunterricht
ISBN 978-3-8325-1757-1 40.50 EUR

73 Isabel Wahser: Training von naturwissenschaftlichen Arbeitsweisen zur Unterstützung experimenteller Kleingruppenarbeit im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-1815-8 40.50 EUR

74 Claus Brell: Lernmedien und Lernerfolg - reale und virtuelle Materialien im Physikunterricht. *Empirische Untersuchungen in achten Klassen an Gymnasien (Laborstudie) zum Computereinsatz mit Simulation und IBE*
ISBN 978-3-8325-1829-5 40.50 EUR

75 Rainer Wackermann: Überprüfung der Wirksamkeit eines Basismodell-Trainings für Physiklehrer
ISBN 978-3-8325-1882-0 40.50 EUR

76 Oliver Tepner: Effektivität von Aufgaben im Chemieunterricht der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-1919-3 40.50 EUR

77 Claudia Geyer: Museums- und Science-Center-Besuche im naturwissenschaftlichen Unterricht aus einer motivationalen Perspektive. *Die Sicht von Lehrkräften und Schülerinnen und Schülern*
ISBN 978-3-8325-1922-3 40.50 EUR

78 Tobias Leonhard: Professionalisierung in der Lehrerbildung. *Eine explorative Studie zur Entwicklung professioneller Kompetenzen in der Lehrererstausbildung*
ISBN 978-3-8325-1924-7 40.50 EUR

79 Alexander Kauertz: Schwierigkeitserzeugende Merkmale physikalischer Leistungstestaufgaben
ISBN 978-3-8325-1925-4 40.50 EUR

80 Regina Hübinger: Schüler auf Weltreise. *Entwicklung und Evaluation von Lehr-/ Lernmaterialien zur Förderung experimentell-naturwissenschaftlicher Kompetenzen für die Jahrgangsstufen 5 und 6*
ISBN 978-3-8325-1932-2 40.50 EUR

81 Christine Waltner: Physik lernen im Deutschen Museum
ISBN 978-3-8325-1933-9 40.50 EUR

82 Torsten Fischer: Handlungsmuster von Physiklehrkräften beim Einsatz neuer Medien. *Fallstudien zur Unterrichtspraxis*
ISBN 978-3-8325-1948-3 42.00 EUR

83 Corinna Kieren: Chemiehausaufgaben in der Sekundarstufe I des Gymnasiums. *Fragebogenerhebung zur gegenwärtigen Praxis und Entwicklung eines optimierten Hausaufgabendesigns im Themenbereich Säure-Base*
978-3-8325-1975-9 37.00 EUR

84 Marco Thiele: Modelle der Thermohalinen Zirkulation im Unterricht. *Eine empirische Studie zur Förderung des Modellverständnisses*
ISBN 978-3-8325-1982-7 40.50 EUR

85 Bernd Zinn: Physik lernen, um Physik zu lehren. *Eine Möglichkeit für interessanteren Physikunterricht*
ISBN 978-3-8325-1995-7 39.50 EUR

86 Esther Klaes: Außerschulische Lernorte im naturwissenschaftlichen Unterricht. *Die Perspektive der Lehrkraft*
ISBN 978-3-8325-2006-9 43.00 EUR

87 Marita Schmidt: Kompetenzmodellierung und -diagnostik im Themengebiet Energie der Sekundarstufe I. *Entwicklung und Erprobung eines Testinventars*
ISBN 978-3-8325-2024-3 37.00 EUR

88 Gudrun Franke-Braun: Aufgaben mit gestuften Lernhilfen. *Ein Aufgabenformat zur Förderung der sachbezogenen Kommunikation und Lernleistung für den naturwissenschaftlichen Unterricht*
ISBN 978-3-8325-2026-7 38.00 EUR

89 Silke Klos: Kompetenzförderung im naturwissenschaftlichen Anfangsunterricht. *Der Einfluss eines integrierten Unterrichtskonzepts*
ISBN 978-3-8325-2133-2 37.00 EUR

90 Ulrike Elisabeth Burkard: Quantenphysik in der Schule. *Bestandsaufnahme, Perspektiven und Weiterentwicklungsmöglichkeiten durch die Implementation eines Medienservers*
ISBN 978-3-8325-2215-5 43.00 EUR

91 Ulrike Gromadecki: Argumente in physikalischen Kontexten. *Welche Geltungsgründe halten Physikanfänger für überzeugend?*
ISBN 978-3-8325-2250-6 41.50 EUR

92 Jürgen Bruns: Auf dem Weg zur Förderung naturwissenschaftsspezifischer Vorstellungen von zukünftigen Chemie-Lehrenden
ISBN 978-3-8325-2257-5 43.50 EUR

93 Cornelius Marsch: Räumliche Atomvorstellung. *Entwicklung und Erprobung eines Unterrichtskonzeptes mit Hilfe des Computers*
ISBN 978-3-8325-2293-3 82.50 EUR

94 Maja Brückmann: Sachstrukturen im Physikunterricht. *Ergebnisse einer Videostudie*
ISBN 978-3-8325-2272-8 39.50 EUR

95 Sabine Fechner: Effects of Context-oriented Learning on Student Interest and Achievement in Chemistry Education
ISBN 978-3-8325-2343-5 36.50 EUR

96 Clemens Nagel: eLearning im Physikalischen Anfängerpraktikum
ISBN 978-3-8325-2355-8 39.50 EUR

97 Josef Riese: Professionelles Wissen und professionelle Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften
ISBN 978-3-8325-2376-3 39.00 EUR

98 Sascha Bernholt: Kompetenzmodellierung in der Chemie. *Theoretische und empirische Reflexion am Beispiel des Modells hierarchischer Komplexität*
ISBN 978-3-8325-2447-0 40.00 EUR

99 Holger Christoph Stawitz: Auswirkung unterschiedlicher Aufgabenprofile auf die Schülerleistung. *Vergleich von Naturwissenschafts- und Problemlöseaufgaben der PISA 2003-Studie*
ISBN 978-3-8325-2451-7 37.50 EUR

100 Hans Ernst Fischer, Elke Sumfleth (Hrsg.): nwu-essen – 10 Jahre Essener Forschung zum naturwissenschaftlichen Unterricht
ISBN 978-3-8325-3331-1 40.00 EUR

101 Hendrik Härtig: Sachstrukturen von Physikschulbüchern als Grundlage zur Bestimmung der Inhaltsvalidität eines Tests
ISBN 978-3-8325-2512-5 34.00 EUR

102 Thomas Grüß-Niehaus: Zum Verständnis des Löslichkeitskonzeptes im Chemieunterricht. *Der Effekt von Methoden progressiver und kollaborativer Reflexion*
ISBN 978-3-8325-2537-8 40.50 EUR

103 Patrick Bronner: Quantenoptische Experimente als Grundlage eines Curriculums zur Quantenphysik des Photons
ISBN 978-3-8325-2540-8 36.00 EUR

104 Adrian Voßkühler: Blickbewegungsmessung an Versuchsaufbauten. *Studien zur Wahrnehmung, Verarbeitung und Usability von physikbezogenen Experimenten am Bildschirm und in der Realität*
ISBN 978-3-8325-2548-4 47.50 EUR

105 Verena Tobias: Newton'sche Mechanik im Anfangsunterricht. *Die Wirksamkeit einer Einführung über die zweidimensionale Dynamik auf das Lehren und Lernen*
ISBN 978-3-8325-2558-3 54.00 EUR

106 Christian Rogge: Entwicklung physikalischer Konzepte in aufgabenbasierten Lernumgebungen
ISBN 978-3-8325-2574-3 45.00 EUR

107 Mathias Ropohl: Modellierung von Schülerkompetenzen im Basiskonzept Chemische Reaktion. *Entwicklung und Analyse von Testaufgaben*
ISBN 978-3-8325-2609-2 36.50 EUR

108 Christoph Kulgemeyer: Physikalische Kommunikationskompetenz. *Modellierung und Diagnostik*
ISBN 978-3-8325-2674-0 44.50 EUR

109 Jennifer Olszewski: The Impact of Physics Teachers' Pedagogical Content Knowledge on Teacher Actions and Student Outcomes
ISBN 978-3-8325-2680-1 33.50 EUR

110 Annika Ohle: Primary School Teachers' Content Knowledge in Physics and its Impact on Teaching and Students' Achievement
ISBN 978-3-8325-2684-9 36.50 EUR

111 Susanne Mannel: Assessing scientific inquiry. *Development and evaluation of a test for the low-performing stage*
ISBN 978-3-8325-2761-7 40.00 EUR

112 Michael Plomer: Physik physiologisch passend praktiziert. *Eine Studie zur Lernwirksamkeit von traditionellen und adressatenspezifischen Physikpraktika für die Physiologie*
ISBN 978-3-8325-2804-1 34.50 EUR

113 Alexandra Schulz: Experimentierspezifische Qualitätsmerkmale im Chemieunterricht. *Eine Videostudie*
ISBN 978-3-8325-2817-1 40.00 EUR

114 Franz Boczianowski: Eine empirische Untersuchung zu Vektoren im Physikunterricht der Mittelstufe
ISBN 978-3-8325-2843-0 39.50 EUR

115 Maria Ploog: Internetbasiertes Lernen durch Textproduktion im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-2853-9 39.50 EUR

116 Anja Dhein: Lernen in Explorier- und Experimentiersituationen. *Eine explorative Studie zu Bedeutungsentwicklungsprozessen bei Kindern im Alter zwischen 4 und 6 Jahren*
ISBN 978-3-8325-2859-1 45.50 EUR

117 Irene Neumann: Beyond Physics Content Knowledge. *Modeling Competence Regarding Nature of Scientific Inquiry and Nature of Scientific Knowledge*
ISBN 978-3-8325-2880-5 37.00 EUR

118 Markus Emden: Prozessorientierte Leistungsmessung des naturwissenschaftlich-experimentellen Arbeitens. *Eine vergleichende Studie zu Diagnoseinstrumenten zu Beginn der Sekundarstufe I*
ISBN 978-3-8325-2867-6 38.00 EUR

119 Birgit Hofmann: Analyse von Blickbewegungen von Schülern beim Lesen von physikbezogenen Texten mit Bildern. *Eye Tracking als Methodenwerkzeug in der physikdidaktischen Forschung*
ISBN 978-3-8325-2925-3 59.00 EUR

120 Rebecca Knobloch: Analyse der fachinhaltlichen Qualität von Schüleräußerungen und deren Einfluss auf den Lernerfolg. *Eine Videostudie zu kooperativer Kleingruppenarbeit*
ISBN 978-3-8325-3006-8 36.50 EUR

121 Julia Hostenbach: Entwicklung und Prüfung eines Modells zur Beschreibung der Bewertungskompetenz im Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-3013-6 38.00 EUR

122 Anna Windt: Naturwissenschaftliches Experimentieren im Elementarbereich. *Evaluation verschiedener Lernsituationen*
ISBN 978-3-8325-3020-4 43.50 EUR

123 Eva Kölbach: Kontexteinflüsse beim Lernen mit Lösungsbeispielen
ISBN 978-3-8325-3025-9 38.50 EUR

124 Anna Lau: Passung und vertikale Vernetzung im Chemie- und Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-3021-1 36.00 EUR

125 Jan Lamprecht: Ausbildungswege und Komponenten professioneller Handlungskompetenz. *Vergleich von Quereinsteigern mit Lehramtsabsolventen für Gymnasien im Fach Physik*
ISBN 978-3-8325-3035-8 38.50 EUR

126 Ulrike Böhm: Förderung von Verstehensprozessen unter Einsatz von Modellen
ISBN 978-3-8325-3042-6 41.00 EUR

127 Sabrina Dollny: Entwicklung und Evaluation eines Testinstruments zur Erfassung des fachspezifischen Professionswissens von Chemielehrkräften
ISBN 978-3-8325-3046-4 37.00 EUR

128 Monika Zimmermann: Naturwissenschaftliche Bildung im Kindergarten. *Eine integrative Längsschnittstudie zur Kompetenzentwicklung von Erzieherinnen*
ISBN 978-3-8325-3053-2 54.00 EUR

129 Ulf Saballus: Über das Schlussfolgern von Schülerinnen und Schülern zu öffentlichen Kontroversen mit naturwissenschaftlichem Hintergrund. *Eine Fallstudie*
ISBN 978-3-8325-3086-0 39.50 EUR

130 Olaf Krey: Zur Rolle der Mathematik in der Physik. *Wissenschaftstheoretische Aspekte und Vorstellungen Physiklernender*
ISBN 978-3-8325-3101-0 46.00 EUR

131 Angelika Wolf: Zusammenhänge zwischen der Eigenständigkeit im Physikunterricht, der Motivation, den Grundbedürfnissen und dem Lernerfolg von Schülern
ISBN 978-3-8325-3161-4 45.00 EUR

132 Johannes Börlin: Das Experiment als Lerngelegenheit. *Vom interkulturellen Vergleich des Physikunterrichts zu Merkmalen seiner Qualität*
ISBN 978-3-8325-3170-6 45.00 EUR

133 Olaf Uhden: Mathematisches Denken im Physikunterricht. *Theorieentwicklung und Problemanalyse*
ISBN 978-3-8325-3170-6 45.00 EUR

134 Christoph Gut: Modellierung und Messung experimenteller Kompetenz. *Analyse eines large-scale Experimentiertests*
ISBN 978-3-8325-3213-0 40.00 EUR

135 Antonio Rueda: Lernen mit ExploMultimedial in kolumbianischen Schulen. *Analyse von kurzzeitigen Lernprozessen und der Motivation beim länderübergreifenden Einsatz einer deutschen computergestützten multimedialen Lernumgebung für den naturwissenschaftlichen Unterricht*
ISBN 978-3-8325-3218-5 45.50 EUR

136 Krisztina Berger: Bilder, Animationen und Notizen. *Empirische Untersuchung zur Wirkung einfacher visueller Repräsentationen und Notizen auf den Wissenserwerb in der Optik*
ISBN 978-3-8325-3238-3 41.50 EUR

137 Antony Crossley: Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher physikalischer Konzepte auf den Wissenserwerb in der Thermodynamik der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-3275-8 40.00 EUR

138 Tobias Viering: Entwicklung physikalischer Kompetenz in der Sekundarstufe I. *Validierung eines Kompetenzentwicklungsmodells für das Energiekonzept im Bereich Fachwissen*
ISBN 978-3-8325-3277-2 37.00 EUR

139 Nico Schreiber: Diagnostik experimenteller Kompetenz. *Validierung technologiegestützter Testverfahren im Rahmen eines Kompetenzstrukturmodells*
ISBN 978-3-8325-3284-0 39.00 EUR

140 Sarah Hundertmark: Einblicke in kollaborative Lernprozesse. *Eine Fallstudie zur reflektierenden Zusammenarbeit unterstützt durch die Methoden Concept Mapping und Lernbegleitbogen*
ISBN 978-3-8325-3251-2 43.00 EUR

141 Ronny Scherer: Analyse der Struktur, Messinvarianz und Ausprägung komplexer Problemlösekompetenz im Fach Chemie. *Eine Querschnittstudie in der Sekundarstufe I und am Übergang zur Sekundarstufe II*
ISBN 978-3-8325-3312-0 43.00 EUR

142 Patricia Heitmann: Bewertungskompetenz im Rahmen naturwissenschaftlicher Problemlöseprozesse. *Modellierung und Diagnose der Kompetenzen Bewertung und analytisches Problemlösen für das Fach Chemie*
ISBN 978-3-8325-3314-4 37.00 EUR

143 Jan Fleischhauer: Wissenschaftliches Argumentieren und Entwicklung von Konzepten beim Lernen von Physik
ISBN 978-3-8325-3325-0 35.00 EUR

144 Nermin Özcan: Zum Einfluss der Fachsprache auf die Leistung im Fach Chemie. *Eine Förderstudie zur Fachsprache im Chemieunterricht*
ISBN 978-3-8325-3328-1 36.50 EUR

145 Helena van Vorst: Kontextmerkmale und ihr Einfluss auf das Schülerinteresse im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3321-2 38.50 EUR

146 Janine Cappell: Fachspezifische Diagnosekompetenz angehender Physiklehrkräfte in der ersten Ausbildungsphase
ISBN 978-3-8325-3356-4 38.50 EUR

147 Susanne Bley: Förderung von Transferprozessen im Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-3407-3 40.50 EUR

148 Cathrin Blaes: Die übungsgestützte Lehrerpräsentation im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Evaluation der Effektivität*
ISBN 978-3-8325-3409-7 43.50 EUR

149 Julia Suckut: Die Wirksamkeit von piko-OWL als Lehrerfortbildung. Eine Evaluation zum Projekt *Physik im Kontext* in Fallstudien
ISBN 978-3-8325-3440-0 45.00 EUR

150 Alexandra Dorschu: Die Wirkung von Kontexten in Physikkompetenztestaufgaben
ISBN 978-3-8325-3446-2 37.00 EUR

151 Jochen Scheid: Multiple Repräsentationen, Verständnis physikalischer Experimente und kognitive Aktivierung: *Ein Beitrag zur Entwicklung der Aufgabenkultur*
ISBN 978-3-8325-3449-3 49.00 EUR

152 Tim Plasa: Die Wahrnehmung von Schülerlaboren und Schülerforschungszentren
ISBN 978-3-8325-3483-7 35.50 EUR

153 Felix Schoppmeier: Physikkompetenz in der gymnasialen Oberstufe.*Entwicklung und Validierung eines Kompetenzstrukturmodells für den Kompetenzbereich Umgang mit Fachwissen*
ISBN 978-3-8325-3502-5 36.00 EUR

154 Katharina Groß: Experimente alternativ dokumentieren. *Eine qualitative Studie zur Förderung der Diagnose- und Differenzierungskompetenz in der Chemielehrerbildung*
ISBN 978-3-8325-3508-7 43.50 EUR

155 Barbara Hank: Konzeptwandelprozesse im Anfangsunterricht Chemie. *Eine quasiexperimentelle Längsschnittstudie*
ISBN 978-3-8325-3519-3 38.50 EUR

156 Katja Freyer: Zum Einfluss von Studieneingangsvoraussetzungen auf den Studienerfolg Erstsemesterstudierender im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3544-5 38.00 EUR

157 Alexander Rachel: Auswirkungen instruktionaler Hilfen bei der Einführung des (Ferro-)Magnetismus. *Eine Vergleichsstudie in der Primar- und Sekundarstufe*
ISBN 978-3-8325-3548-3 43.50 EUR

158 Sebastian Ritter: Einfluss des Lerninhalts Nanogrößeneffekte auf Teilchen- und Teilchenmodellvorstellungen von Schülerinnen und Schülern
ISBN 978-3-8325-3558-2 36.00 EUR

159 Andrea Harbach: Problemorientierung und Vernetzung in kontextbasierten Lernaufgaben
ISBN 978-3-8325-3564-3 39.00 EUR

160 David Obst: Interaktive Tafeln im Physikunterricht. *Entwicklung und Evaluation einer Lehrerfortbildung*
ISBN 978-3-8325-3582-7 40.50 EUR

161 Sophie Kirschner: Modellierung und Analyse des Professionswissens von Physiklehrkräften
ISBN 978-3-8325-3601-5 35.00 EUR

162 Katja Stief: Selbstregulationsprozesse und Hausaufgabenmotivation im Chemieunterricht
ISBN 978-3-8325-3631-2 34.00 EUR

163 Nicola Meschede: Professionelle Wahrnehmung der inhaltlichen Strukturierung im naturwissenschaftlichen Grundschulunterricht. *Theoretische Beschreibung und empirische Erfassung*
ISBN 978-3-8325-3668-8 37.00 EUR

164 Johannes Maximilian Barth: Experimentieren im Physikunterricht der gymnasialen Oberstufe. *Eine Rekonstruktion übergeordneter Einbettungsstrategien*
ISBN 978-3-8325-3681-7 39.00 EUR

165 Sandra Lein: Das Betriebspraktikum in der Lehrerbildung. *Eine Untersuchung zur Förderung der Wissenschafts- und Technikbildung im allgemeinbildenden Unterricht*
ISBN 978-3-8325-3698-5 40.00 EUR

166 Veranika Maiseyenka: Modellbasiertes Experimentieren im Unterricht. *Praxistauglichkeit und Lernwirkungen*
ISBN 978-3-8325-3708-1 38.00 EUR

167 Christoph Stolzenberger: Der Einfluss der didaktischen Lernumgebung auf das Erreichen geforderter Bildungsziele am Beispiel der W- und P-Seminare im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-3708-1 38.00 EUR

168 Pia Altenburger: Mehrebenenregressionsanalysen zum Physiklernen im Sachunterricht der Primarstufe. *Ergebnisse einer Evaluationsstudie.*
ISBN 978-3-8325-3717-3 37.50 EUR

169 Nora Ferber: Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zur Erfassung von Kompetenzentwicklung im Fach Chemie in der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-3727-2 39.50 EUR

170 Anita Stender: Unterrichtsplanung: Vom Wissen zum Handeln.
Theoretische Entwicklung und empirische Überprüfung des Transformationsmodells der Unterrichtsplanung
ISBN 978-3-8325-3750-0 41.50 EUR

171 Jenna Koenen: Entwicklung und Evaluation von experimentunterstützten Lösungsbeispielen zur Förderung naturwissenschaftlich-experimenteller Arbeitsweisen
ISBN 978-3-8325-3785-2 43.00 EUR

172 Teresa Henning: Empirische Untersuchung kontextorientierter Lernumgebungen in der Hochschuldidaktik. *Entwicklung und Evaluation kontextorientierter Aufgaben in der Studieneingangsphase für Fach- und Nebenfachstudierende der Physik*
ISBN 978-3-8325-3801-9 43.00 EUR

173 Alexander Pusch: Fachspezifische Instrumente zur Diagnose und individuellen Förderung von Lehramtsstudierenden der Physik
ISBN 978-3-8325-3829-3 38.00 EUR

174 Christoph Vogelsang: Validierung eines Instruments zur Erfassung der professionellen Handlungskompetenz von (angehenden) Physiklehrkräften. *Zusammenhangsanalysen zwischen Lehrerkompetenz und Lehrerperformanz*
ISBN 978-3-8325-3846-0 50.50 EUR

175 Ingo Brebeck: Selbstreguliertes Lernen in der Studieneingangsphase im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3859-0 37.00 EUR

176 Axel Eghtessad: Merkmale und Strukturen von Professionalisierungsprozessen in der ersten und zweiten Phase der Chemielehrerbildung. *Eine empirisch-qualitative Studie mit niedersächsischen Fachleiter_innen der Sekundarstufenlehrämter*
ISBN 978-3-8325-3861-3 45.00 EUR

177 Andreas Nehring: Wissenschaftliche Denk- und Arbeitsweisen im Fach Chemie. Eine kompetenzorientierte Modell- und Testentwicklung für den Bereich der Erkenntnisgewinnung
ISBN 978-3-8325-3872-9 39.50 EUR

178 Maike Schmidt: Professionswissen von Sachunterrichtslehrkräften. Zusammenhangsanalyse zur Wirkung von Ausbildungshintergrund und Unterrichtserfahrung auf das fachspezifische Professionswissen im Unterrichtsinhalt „Verbrennung“
ISBN 978-3-8325-3907-8 38.50 EUR

179 Jan Winkelmann: Auswirkungen auf den Fachwissenszuwachs und auf affektive Schülermerkmale durch Schüler- und Demonstrationsexperimente im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-3915-3 41.00 EUR

180 Iwen Kobow: Entwicklung und Validierung eines Testinstrumentes zur Erfassung der Kommunikationskompetenz im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-3927-6 34.50 EUR

181 Yvonne Gramzow: Fachdidaktisches Wissen von Lehramtsstudierenden im Fach Physik. Modellierung und Testkonstruktion
ISBN 978-3-8325-3931-3 42.50 EUR

182 Evelin Schröter: Entwicklung der Kompetenzerwartung durch Lösen physikalischer Aufgaben einer multimedialen Lernumgebung
ISBN 978-3-8325-3975-7 54.50 EUR

183 Inga Kallweit: Effektivität des Einsatzes von Selbsteinschätzungsbögen im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Individuelle Förderung durch selbstreguliertes Lernen*
ISBN 978-3-8325-3965-8 44.00 EUR

184 Andrea Schumacher: Paving the way towards authentic chemistry teaching. *A contribution to teachers' professional development*
ISBN 978-3-8325-3976-4 48.50 EUR

185 David Woitkowski: Fachliches Wissen Physik in der Hochschulausbildung. *Konzeptualisierung, Messung, Niveaubildung*
ISBN 978-3-8325-3988-7 53.00 EUR

186 Marianne Korner: Cross-Age Peer Tutoring in Physik. *Evaluation einer Unterrichtsmethode*
ISBN 978-3-8325-3979-5 38.50 EUR

187 Simone Nakoinz: Untersuchung zur Verknüpfung submikroskopischer und makroskopischer Konzepte im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4057-9 38.50 EUR

188 Sandra Anus: Evaluation individueller Förderung im Chemieunterricht.*Adaptivität von Lerninhalten an das Vorwissen von Lernenden am Beispiel des Basiskonzeptes Chemische Reaktion*
ISBN 978-3-8325-4059-3 43.50 EUR

189 Thomas Roßbegalle: Fachdidaktische Entwicklungsforschung zum besseren Verständnis atmosphärischer Phänomene. *Treibhauseffekt, saurer Regen und stratosphärischer Ozonabbau als Kontexte zur Vermittlung von Basiskonzepten der Chemie*
ISBN 978-3-8325-4059-3 45.50 EUR

190 Kathrin Steckenmesser-Sander: Gemeinsamkeiten und Unterschiede physikbezogener Handlungs-, Denk- und Lernprozesse von Mädchen und Jungen
ISBN 978-3-8325-4066-1 38.50 EUR

191 Cornelia Geller: Lernprozessorientierte Sequenzierung des Physikunterrichts im Zusammenhang mit Fachwissenserwerb. *Eine Videostudie in Finnland, Deutschland und der Schweiz*
ISBN 978-3-8325-4082-1 35.50 EUR

192 Jan Hofmann: Untersuchung des Kompetenzaufbaus von Physiklehrkräften während einer Fortbildungsmaßnahme
ISBN 978-3-8325-4104-0 38.50 EUR

193 Andreas Dickhäuser: Chemiespezifischer Humor. *Theoriebildung, Materialentwicklung, Evaluation*
ISBN 978-3-8325-4108-8 37.00 EUR

194 Stefan Korte: Die Grenzen der Naturwissenschaft als Thema des Physikunterrichts
ISBN 978-3-8325-4112-5 57.50 EUR

195 Carolin Hülsmann: Kurswahlmotive im Fach Chemie. Eine Studie zum Wahlverhalten und Erfolg von Schülerinnen und Schülern in der gymnasialen Oberstufe
ISBN 978-3-8325-4144-6 49.00 EUR

196 Caroline Körbs: Mindeststandards im Fach Chemie am Ende der Pflichtschulzeit
ISBN 978-3-8325-4148-4 34.00 EUR

197 Andreas Vorholzer: Wie lassen sich Kompetenzen des experimentellen Denkens und Arbeitens fördern? *Eine empirische Untersuchung der Wirkung eines expliziten und eines impliziten Instruktionsansatzes*
ISBN 978-3-8325-4194-1 37.50 EUR

198 Anna Katharina Schmitt: Entwicklung und Evaluation einer Chemielehrerfortbildung zum Kompetenzbereich Erkenntnisgewinnung
ISBN 978-3-8325-4228-3 39.50 EUR

199 Christian Maurer: Strukturierung von Lehr-Lern-Sequenzen
ISBN 978-3-8325-4247-4 36.50 EUR

200 Helmut Fischler, Elke Sumfleth (Hrsg.): Professionelle Kompetenz von Lehrkräften der Chemie und Physik
ISBN 978-3-8325-4523-9 34.00 EUR

201 Simon Zander: Lehrerfortbildung zu Basismodellen und Zusammenhänge zum Fachwissen
ISBN 978-3-8325-4248-1 35.00 EUR

202 Kerstin Arndt: Experimentierkompetenz erfassen.
Analyse von Prozessen und Mustern am Beispiel von Lehramtsstudierenden der Chemie
ISBN 978-3-8325-4266-5 45.00 EUR

203 Christian Lang: Kompetenzorientierung im Rahmen experimentalchemischer Praktika
ISBN 978-3-8325-4268-9 42.50 EUR

204 Eva Cauet: Testen wir relevantes Wissen? *Zusammenhang zwischen dem Professionswissen von Physiklehrkräften und gutem und erfolgreichem Unterrichten*
ISBN 978-3-8325-4276-4 39.50 EUR

205 Patrick Löffler: Modellanwendung in Problemlöseaufgaben. *Wie wirkt Kontext?*
ISBN 978-3-8325-4303-7 35.00 EUR

206 Carina Gehlen: Kompetenzstruktur naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4318-1 43.00 EUR

207 Lars Oettinghaus: Lehrerüberzeugungen und physikbezogenes Professionswissen. *Vergleich von Absolventinnen und Absolventen verschiedener Ausbildungswege im Physikreferendariat*
ISBN 978-3-8325-4319-8 38.50 EUR

208 Jennifer Petersen: Zum Einfluss des Merkmals Humor auf die Gesundheitsförderung im Chemieunterricht der Sekundarstufe I.
Eine Interventionsstudie zum Thema Sonnenschutz
ISBN 978-3-8325-4348-8 40.00 EUR

209 Philipp Straube: Modellierung und Erfassung von Kompetenzen naturwissenschaftlicher Erkenntnisgewinnung bei (Lehramts-) Studierenden im Fach Physik
ISBN 978-3-8325-4351-8 35.50 EUR

210 Martin Dickmann: Messung von Experimentierfähigkeiten. *Validierungsstudien zur Qualität eines computerbasierten Testverfahrens*
ISBN 978-3-8325-4356-3 41.00 EUR

211 Markus Bohlmann: Science Education. Empirie, Kulturen und Mechanismen der Didaktik der Naturwissenschaften
ISBN 978-3-8325-4377-8 44.00 EUR

212 Martin Draude: Die Kompetenz von Physiklehrkräften, Schwierigkeiten von Schülerinnen und Schülern beim eigenständigen Experimentieren zu diagnostizieren
ISBN 978-3-8325-4382-2 37.50 EUR

213 Henning Rode: Prototypen evidenzbasierten Physikunterrichts. *Zwei empirische Studien zum Einsatz von Feedback und Blackboxes in der Sekundarstufe*
ISBN 978-3-8325-4389-1 42.00 EUR

214 Jan-Henrik Kechel: Schülerschwierigkeiten beim eigenständigen Experimentieren. *Eine qualitative Studie am Beispiel einer Experimentieraufgabe zum Hooke'schen Gesetz*
ISBN 978-3-8325-4392-1 55.00 EUR

215 Katharina Fricke: Classroom Management and its Impact on Lesson Outcomes in Physics. *A multi-perspective comparison of teaching practices in primary and secondary schools*
ISBN 978-3-8325-4394-5 40.00 EUR

216 Hannes Sander: Orientierungen von Jugendlichen beim Urteilen und Entscheiden in Kontexten nachhaltiger Entwicklung. *Eine rekonstruktive Perspektive auf Bewertungskompetenz in der Didaktik der Naturwissenschaft*
ISBN 978-3-8325-4434-8 46.00 EUR

217 Inka Haak: Maßnahmen zur Unterstützung kognitiver und metakognitiver Prozesse in der Studieneingangsphase. *Eine Design-Based-Research-Studie zum universitären Lernzentrum Physiktreff*
ISBN 978-3-8325-4437-9 46.50 EUR

218 Martina Brandenburger: Was beeinflusst den Erfolg beim Problemlösen in der Physik? *Eine Untersuchung mit Studierenden*
ISBN 978-3-8325-4409-6 42.50 EUR

219 Corinna Helms: Entwicklung und Evaluation eines Trainings zur Verbesserung der Erklärqualität von Schülerinnen und Schülern im Gruppenpuzzle
ISBN 978-3-8325-4454-6 42.50 EUR

220 Viktoria Rath: Diagnostische Kompetenz von angehenden Physiklehrkräften. *Modellierung, Testinstrumentenentwicklung und Erhebung der Performanz bei der Diagnose von Schülervorstellungen in der Mechanik*
ISBN 978-3-8325-4456-0 42.50 EUR

221 Janne Krüger: Schülerperspektiven auf die zeitliche Entwicklung der Naturwissenschaften
ISBN 978-3-8325-4457-7 45.50 EUR

222 Stefan Mutke: Das Professionswissen von Chemiereferendarinnen und -referendaren in Nordrhein-Westfalen. *Eine Längsschnittstudie*
ISBN 978-3-8325-4458-4 37.50 EUR

223 Sebastian Habig: Systematisch variierte Kontextaufgaben und ihr Einfluss auf kognitive und affektive Schülerfaktoren
ISBN 978-3-8325-4467-6 40.50 EUR

224 Sven Liepertz: Zusammenhang zwischen dem Professionswissen von Physiklehrkräften, dem sachstrukturellen Angebot des Unterrichts und der Schülerleistung
ISBN 978-3-8325-4480-5 34.00 EUR

225 Elina Platova: Optimierung eines Laborpraktikums durch kognitive Aktivierung
ISBN 978-3-8325-4481-2 39.00 EUR

226 Tim Reschke: Lesegeschichten im Chemieunterricht der Sekundarstufe I zur Unterstützung von situationalem Interesse und Lernerfolg
ISBN 978-3-8325-4487-4 41.00 EUR

227 Lena Mareike Walper: Entwicklung der physikbezogenen Interessen und selbstbezogenen Kognitionen von Schülerinnen und Schülern in der Übergangsphase von der Primar- in die Sekundarstufe. *Eine Längsschnittanalyse vom vierten bis zum siebten Schuljahr*
ISBN 978-3-8325-4495-9 43.00 EUR

228 Stefan Anthofer: Förderung des fachspezifischen Professionswissens von Chemielehramtsstudierenden
ISBN 978-3-8325-4498-0 39.50 EUR

229 Marcel Bullinger: Handlungsorientiertes Physiklernen mit instruierten Selbsterklärungen in der Primarstufe. *Eine experimentelle Laborstudie*
ISBN 978-3-8325-4504-8 44.00 EUR

230 Thomas Amenda: Bedeutung fachlicher Elementarisierungen für das Verständnis der Kinematik
ISBN 978-3-8325-4531-4 43.50 EUR

231 Sabrina Milke: Beeinflusst *Priming* das Physiklernen?
Eine empirische Studie zum Dritten Newtonschen Axiom
ISBN 978-3-8325-4549-4 42.00 EUR

232 Corinna Erfmann: Ein anschaulicher Weg zum Verständnis der elektromagnetischen Induktion. *Evaluation eines Unterrichtsvorschlags und Validierung eines Leistungsdiagnoseinstruments*
ISBN 978-3-8325-4550-5 49.50 EUR

233 Hanne Rautenstrauch: Erhebung des (Fach-)Sprachstandes bei Lehramtsstudierenden im Kontext des Faches Chemie
ISBN 978-3-8325-4556-7 40.50 EUR

234 Tobias Klug: Wirkung kontextorientierter physikalischer Praktikumsversuche auf Lernprozesse von Studierenden der Medizin
ISBN 978-3-8325-4558-1 37.00 EUR

235 Mareike Bohrmann: Zur Förderung des Verständnisses der Variablenkontrolle im naturwissenschaftlichen Sachunterricht
ISBN 978-3-8325-4559-8 52.00 EUR

236 Anja Schödl: FALKO-Physik – Fachspezifische Lehrerkompetenzen im Fach Physik. *Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zur Erfassung des fachspezifischen Professionswissens von Physiklehrkräften*
ISBN 978-3-8325-4553-6 40.50 EUR

237 Hilda Scheuermann: Entwicklung und Evaluation von Unterstützungsmaßnahmen zur Förderung der Variablenkontrollstrategie beim Planen von Experimenten
ISBN 978-3-8325-4568-0 39.00 EUR

238 Christian G. Strippel: Naturwissenschaftliche Erkenntnisgewinnung an chemischen Inhalten vermitteln. *Konzeption und empirische Untersuchung einer Ausstellung mit Experimentierstation*
ISBN 978-3-8325-4577-2 41.50 EUR

239 Sarah Rau: Durchführung von Sachunterricht im Vorbereitungsdienst. *Eine längsschnittliche, videobasierte Unterrichtsanalyse*
ISBN 978-3-8325-4579-6 46.00 EUR

240 Thomas Plotz: Lernprozesse zu nicht-sichtbarer Strahlung. *Empirische Untersuchungen in der Sekundarstufe 2*
ISBN 978-3-8325-4624-3 39.50 EUR

241 Wolfgang Aschauer: Elektrische und magnetische Felder. *Eine empirische Studie zu Lernprozessen in der Sekundarstufe II*
ISBN 978-3-8325-4625-0 50.00 EUR

242 Anna Donhauser: Didaktisch rekonstruierte Materialwissenschaft. *Aufbau und Konzeption eines Schülerlabors für den Exzellenzcluster Engineering of Advanced Materials*
ISBN 978-3-8325-4636-6 39.00 EUR

243 Katrin Schüßler: Lernen mit Lösungsbeispielen im Chemieunterricht. *Einflüsse auf Lernerfolg, kognitive Belastung und Motivation*
ISBN 978-3-8325-4640-3 42.50 EUR

244 Timo Fleischer: Untersuchung der chemischen Fachsprache unter besonderer Berücksichtigung chemischer Repräsentationen
ISBN 978-3-8325-4642-7 46.50 EUR

245 Rosina Steininger: Concept Cartoons als Stimuli für Kleingruppendiskussionen im Chemieunterricht. *Beschreibung und Analyse einer komplexen Lerngelegenheit*
ISBN 978-3-8325-4647-2 39.00 EUR

246 Daniel Rehfeldt: Erfassung der Lehrqualität naturwissenschaftlicher Experimentalpraktika
ISBN 978-3-8325-4590-1 40.00 EUR

247 Sandra Puddu: Implementing Inquiry-based Learning in a Diverse Classroom: Investigating Strategies of Scaffolding and Students' Views of Scientific Inquiry
ISBN 978-3-8325-4591-8 35.50 EUR

248 Markus Bliersbach: Kreativität in der Chemie. *Erhebung und Förderung der Vorstellungen von Chemielehramtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-4593-2 44.00 EUR

249 Lennart Kimpel: Aufgaben in der Allgemeinen Chemie. *Zum Zusammenspiel von chemischem Verständnis und Rechenfähigkeit*
ISBN 978-3-8325-4618-2 36.00 EUR

250 Louise Bindel: Effects of integrated learning: explicating a mathematical concept in inquiry-based science camps
ISBN 978-3-8325-4655-7 37.50 EUR

251 Michael Wenzel: Computereinsatz in Schule und Schülerlabor. *Einstellung von Physiklehrkräften zu Neuen Medien*
ISBN 978-3-8325-4659-5 38.50 EUR

252 Laura Muth: Einfluss der Auswertephase von Experimenten im Physikunterricht. *Ergebnisse einer Interventionsstudie zum Zuwachs von Fachwissen und experimenteller Kompetenz von Schülerinnen und Schülern*
ISBN 978-3-8325-4675-5 36.50 EUR

253 Annika Fricke: Interaktive Skripte im Physikalischen Praktikum. *Entwicklung und Evaluation von Hypermedien für die Nebenfachausbildung*
ISBN 978-3-8325-4676-2 41.00 EUR

254 Julia Haase: Selbstbestimmtes Lernen im naturwissenschaftlichen Sachunterricht. *Eine empirische Interventionsstudie mit Fokus auf Feedback und Kompetenzerleben*
ISBN 978-3-8325-4685-4 38.50 EUR

255 Antje J. Heine: Was ist Theoretische Physik? *Eine wissenschaftstheoretische Betrachtung und Rekonstruktion von Vorstellungen von Studierenden und Dozenten über das Wesen der Theoretischen Physik*
ISBN 978-3-8325-4691-5 46.50 EUR

256 Claudia Meinhardt: Entwicklung und Validierung eines Testinstruments zu Selbstwirksamkeitserwartungen von (angehenden) Physiklehrkräften in physikdidaktischen Handlungsfeldern
ISBN 978-3-8325-4712-7 47.00 EUR

257 Ann-Kathrin Schlüter: Professionalisierung angehender Chemielehrkräfte für einen Gemeinsamen Unterricht
ISBN 978-3-8325-4713-4 53.50 EUR

258 Stefan Richtberg: Elektronenbahnen in Feldern. Konzeption und Evaluation einer webbasierten Lernumgebung
ISBN 978-3-8325-4723-3 49.00 EUR

259 Jan-Philipp Burde: Konzeption und Evaluation eines Unterrichtskonzepts zu einfachen Stromkreisen auf Basis des Elektronengasmodells
ISBN 978-3-8325-4726-4 57.50 EUR

260 Frank Finkenberg: Flipped Classroom im Physikunterricht
ISBN 978-3-8325-4737-4 42.50 EUR

261 Florian Treisch: Die Entwicklung der Professionellen Unterrichtswahrnehmung im Lehr-Lern-Labor Seminar
ISBN 978-3-8325-4741-4 41.50 EUR

262 Desiree Mayr: Strukturiertheit des experimentellen naturwissenschaftlichen Problemlöseprozesses
ISBN 978-3-8325-4757-8 37.00 EUR

263 Katrin Weber: Entwicklung und Validierung einer Learning Progression für das Konzept der chemischen Reaktion in der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-4762-2 48.50 EUR

264 Hauke Bartels: Entwicklung und Bewertung eines performanznahen Videovignettentests zur Messung der Erklärfähigkeit von Physiklehrkräften
ISBN 978-3-8325-4804-9 37.00 EUR

265 Karl Marniok: Zum Wesen von Theorien und Gesetzen in der Chemie. *Begriffsanalyse und Förderung der Vorstellungen von Lehramtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-4805-6 42.00 EUR

266 Marisa Holzapfel: Fachspezifischer Humor als Methode in der Gesundheitsbildung im Übergang von der Primarstufe zur Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-4808-7 50.00 EUR

267 Anna Stolz: Die Auswirkungen von Experimentiersituationen mit unterschiedlichem Öffnungsgrad auf Leistung und Motivation der Schülerinnen und Schüler
ISBN 978-3-8325-4781-3 38.00 EUR

268 Nina Ulrich: Interaktive Lernaufgaben in dem digitalen Schulbuch eChemBook. *Einfluss des Interaktivitätsgrads der Lernaufgaben und des Vorwissens der Lernenden auf den Lernerfolg*
ISBN 978-3-8325-4814-8 43.50 EUR

269 Kim-Alessandro Weber: Quantenoptik in der Lehrerfortbildung. *Ein bedarfsgeprägtes Fortbildungskonzept zum Quantenobjekt „Photon“ mit Realexperimenten*
ISBN 978-3-8325-4792-9 55.00 EUR

270 Nina Skorsetz: Empathisierer und Systematisierer im Vorschulalter. *Eine Fragebogen- und Videostudie zur Motivation, sich mit Naturphänomenen zu beschäftigen*
ISBN 978-3-8325-4825-4 43.50 EUR

271 Franziska Kehne: Analyse des Transfers von kontextualisiert erworbenem Wissen im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4846-9 45.00 EUR

272 Markus Elsholz: Das akademische Selbstkonzept angehender Physiklehrkräfte als Teil ihrer professionellen Identität. *Dimensionalität und Veränderung während einer zentralen Praxisphase*
ISBN 978-3-8325-4857-5 37.50 EUR

273 Joachim Müller: Studienerfolg in der Physik. *Zusammenhang zwischen Modellierungskompetenz und Studienerfolg*
ISBN 978-3-8325-4859-9 35.00 EUR

274 Jennifer Dörschelln: Organische Leuchtdioden. *Implementation eines innovativen Themas in den Chemieunterricht*
ISBN 978-3-8325-4865-0 59.00 EUR

275 Stephanie Strelow: Beliefs von Studienanfängern des Kombi-Bachelors Physik über die Natur der Naturwissenschaften
ISBN 978-3-8325-4881-0 40.50 EUR

276 Dennis Jaeger: Kognitive Belastung und aufgabenspezifische sowie personenspezifische Einflussfaktoren beim Lösen von Physikaufgaben
ISBN 978-3-8325-4928-2 50.50 EUR

277 Vanessa Fischer: Der Einfluss von Interesse und Motivation auf die Messung von Fach- und Bewertungskompetenz im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4933-6 39.00 EUR

278 René Dohrmann: Professionsbezogene Wirkungen einer Lehr-Lern-Labor-Veranstaltung. *Eine multimethodische Studie zu den professionsbezogenen Wirkungen einer Lehr-Lern-Labor-Blockveranstaltung auf Studierende der Bachelorstudiengänge Lehramt Physik und Grundschulpädagogik (Sachunterricht)*
ISBN 978-3-8325-4958-9 40.00 EUR

279 Meike Bergs: Can We Make Them Use These Strategies? *Fostering Inquiry-Based Science Learning Skills with Physical and Virtual Experimentation Environments*
ISBN 978-3-8325-4962-6 39.50 EUR

280 Marie-Therese Hauerstein: Untersuchung zur Effektivität von Strukturierung und Binnendifferenzierung im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Evaluation der Strukturierungshilfe Lernleiter*
ISBN 978-3-8325-4982-4 42.50 EUR

281 Verena Zucker: Erkennen und Beschreiben von formativem Assessment im naturwissenschaftlichen Grundschulunterricht. *Entwicklung eines Instruments zur Erfassung von Teilfähigkeiten der professionellen Wahrnehmung von Lehramtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-4991-6 38.00 EUR

282 Victoria Telser: Erfassung und Förderung experimenteller Kompetenz von Lehrkräften im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-4996-1 50.50 EUR

283 Kristine Tschirschky: Entwicklung und Evaluation eines gedächtnisorientierten Aufgabendesigns für Physikaufgaben
ISBN 978-3-8325-5002-8 42.50 EUR

284 Thomas Elert: Course Success in the Undergraduate General Chemistry Lab
ISBN 978-3-8325-5004-2 41.50 EUR

285 Britta Kalthoff: Explizit oder implizit? *Untersuchung der Lernwirksamkeit verschiedener fachmethodischer Instruktionen im Hinblick auf fachmethodische und fachinhaltliche Fähigkeiten von Sachunterrichtsstudierenden*
ISBN 978-3-8325-5013-4 37.50 EUR

286 Thomas Dickmann: Visuelles Modellverständnis und Studienerfolg in der Chemie. *Zwei Seiten einer Medaille*
ISBN 978-3-8325-5016-5 44.00 EUR

287 Markus Sebastian Feser: Physiklehrkräfte korrigieren Schülertexte. *Eine Explorationsstudie zur fachlich-konzeptuellen und sprachlichen Leistungsfeststellung und -beurteilung im Physikunterricht*
ISBN 978-3-8325-5020-2 49.00 EUR

288 Matylda Dudzinska: Lernen mit Beispielaufgaben und Feedback im Physikunterricht der Sekundarstufe 1. *Energieerhaltung zur Lösung von Aufgaben nutzen*
ISBN 978-3-8325-5025-7 47.00 EUR

289 Ines Sonnenschein: Naturwissenschaftliche Denk- und Arbeitsprozesse Studierender im Labor
ISBN 978-3-8325-5033-2 52.00 EUR

290 Florian Simon: Der Einfluss von Betreuung und Betreuenden auf die Wirksamkeit von Schülerlaborbesuchen. *Eine Zusammenhangsanalyse von Betreuungsqualität, Betreuermerkmalen und Schülerlaborzielen sowie Replikationsstudie zur Wirksamkeit von Schülerlaborbesuchen*
ISBN 978-3-8325-5036-3 49.50 EUR

291 Marie-Annette Geyer: Physikalisch-mathematische Darstellungswechsel funktionaler Zusammenhänge. *Das Vorgehen von SchülerInnen der Sekundarstufe 1 und ihre Schwierigkeiten*
ISBN 978-3-8325-5047-9 46.50 EUR

292 Susanne Digel: Messung von Modellierungskompetenz in Physik. *Theoretische Herleitung und empirische Prüfung eines Kompetenzmodells physikspezifischer Modellierungskompetenz*
ISBN 978-3-8325-5055-4 41.00 EUR

293 Sönke Janssen: Angebots-Nutzungs-Prozesse eines Schülerlabors analysieren und gestalten. *Ein design-based research Projekt*
ISBN 978-3-8325-5065-3 57.50 EUR

294 Knut Wille: Der Productive Failure Ansatz als Beitrag zur Weiterentwicklung der Aufgabenkultur
ISBN 978-3-8325-5074-5 49.00 EUR

295 Lisanne Kraeva: Problemlösestrategien von Schülerinnen und Schülern diagnostizieren
ISBN 978-3-8325-5110-0 59.50 EUR

296 Jenny Lorentzen: Entwicklung und Evaluation eines Lernangebots im Lehramtsstudium Chemie zur Förderung von Vernetzungen innerhalb des fachbezogenen Professionswissens
ISBN 978-3-8325-5120-9 39.50 EUR

297 Micha Winkelmann: Lernprozesse in einem Schülerlabor unter Berücksichtigung individueller naturwissenschaftlicher Interessenstrukturen
ISBN 978-3-8325-5147-6 48.50 EUR

298 Carina Wöhlke: Entwicklung und Validierung eines Instruments zur Erfassung der professionellen Unterrichtswahrnehmung angehender Physiklehrkräfte
ISBN 978-3-8325-5149-0 43.00 EUR

299 Thomas Schubatzky: Das Amalgam Anfangs-Elektrizitätslehreunterricht. *Eine multiperspektivische Betrachtung in Deutschland und Österreich*
ISBN 978-3-8325-5159-9 50.50 EUR

300 Amany Annaggar: A Design Framework for Video Game-Based Gamification Elements to Assess Problem-solving Competence in Chemistry Education
ISBN 978-3-8325-5150-6 52.00 EUR

301 Alexander Engl: Chemie Pur – Unterrichten in der Natur: *Entwicklung und Evaluation eines kontextorientierten Unterrichtskonzepts im Bereich Outdoor Education zur Änderung der Einstellung zu „Chemie und Natur“*
ISBN 978-3-8325-5174-2 59.00 EUR

302 Christin Marie Sajons: Kognitive und motivationale Dynamik in Schülerlaboren. *Kontextualisierung, Problemorientierung und Autonomieunterstützung der didaktischen Struktur analysieren und weiterentwickeln*
ISBN 978-3-8325-5155-1 56.00 EUR

303 Philipp Bitzenbauer: Quantenoptik an Schulen. *Studie im Mixed-Methods Design zur Evaluation des Erlanger Unterrichtskonzepts zur Quantenoptik*
ISBN 978-3-8325-5123-0 59.00 EUR

304 Malte S. Ubben: Typisierung des Verständnisses mentaler Modelle mittels empirischer Datenerhebung am Beispiel der Quantenphysik
ISBN 978-3-8325-5181-0 43.50 EUR

305 Wiebke Kuske-Janßen: Sprachlicher Umgang mit Formeln von LehrerInnen im Physikunterricht am Beispiel des elektrischen Widerstandes in Klassenstufe 8
ISBN 978-3-8325-5183-4 47.50 EUR

306 Kai Bliesmer: Physik der Küste für außerschulische Lernorte. *Eine Didaktische Rekonstruktion*
ISBN 978-3-8325-5190-2 58.00 EUR

307 Nikola Schild: Eignung von domänenspezifischen Studieneingangsvariablen als Prädiktoren für Studienerfolg im Fach und Lehramt Physik
ISBN 978-3-8325-5226-8 42.00 EUR

308 Daniel Averbeck: Zum Studienerfolg in der Studieneingangsphase des Chemiestudiums. *Der Einfluss kognitiver und affektiv-motivationaler Variablen*
ISBN 978-3-8325-5227-5 51.00 EUR

309 Martina Strübe: Modelle und Experimente im Chemieunterricht. *Eine Videostudie zum fachspezifischen Lehrerwissen und -handeln*
ISBN 978-3-8325-5245-9 45.50 EUR

310 Wolfgang Becker: Auswirkungen unterschiedlicher experimenteller Repräsentationen auf den Kenntnisstand bei Grundschulkindern
ISBN 978-3-8325-5255-8 50.00 EUR

311 Marvin Rost: Modelle als Mittel der Erkenntnisgewinnung im Chemieunterricht der Sekundarstufe I. *Entwicklung und quantitative Dimensionalitätsanalyse eines Testinstruments aus epistemologischer Perspektive*
ISBN 978-3-8325-5256-5 44.00 EUR

312 Christina Kobl: Förderung und Erfassung der Reflexionskompetenz im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-5259-6 41.00 EUR

313 Ann-Kathrin Beretz: Diagnostische Prozesse von Studierenden des Lehramts – *eine Videostudie in den Fächern Physik und Mathematik*
ISBN 978-3-8325-5288-6 45.00 EUR

314 Judith Breuer: Implementierung fachdidaktischer Innovationen durch das Angebot materialgestützter Unterrichtskonzeptionen. *Fallanalysen zum Nutzungsverhalten von Lehrkräften am Beispiel des Münchener Lehrgangs zur Quantenmechanik*
ISBN 978-3-8325-5293-0 50.50 EUR

315 Michaela Oettle: Modellierung des Fachwissens von Lehrkräften in der Teilchenphysik. *Eine Delphi-Studie*
ISBN 978-3-8325-5305-0 57.50 EUR

316 Volker Brüggemann: Entwicklung und Pilotierung eines adaptiven Multistage-Tests zur Kompetenzerfassung im Bereich naturwissenschaftlichen Denkens
ISBN 978-3-8325-5331-9 40.00 EUR

317 Stefan Müller: Die Vorläufigkeit und soziokulturelle Eingebundenheit naturwissenschaftlicher Erkenntnisse. *Kritische Reflexion, empirische Befunde und fachdidaktische Konsequenzen für die Chemielehrer*innenbildung*
ISBN 978-3-8325-5343-2 63.00 EUR

318 Laurence Müller: Alltagsentscheidungen für den Chemieunterricht erkennen und Entscheidungsprozesse explorativ begleiten
ISBN 978-3-8325-5379-1 59.00 EUR

319 Lars Ehlert: Entwicklung und Evaluation einer Lehrkräftefortbildung zur Planung von selbstgesteuerten Experimenten
ISBN 978-3-8325-5393-71 41.50 EUR

320 Florian Seiler: Entwicklung und Evaluation eines Seminarkonzepts zur Förderung der experimentellen Planungskompetenz von Lehramtsstudierenden im Fach Chemie
ISBN 978-3-8325-5397-5 47.50 EUR

321 Nadine Boele: Entwicklung eines Messinstruments zur Erfassung der professionellen Unterrichtswahrnehmung von (angehenden) Chemielehrkräften hinsichtlich der Lernunterstützung
ISBN 978-3-8325-5402-6 46.50 EUR

322 Franziska Zimmermann: Entwicklung und Evaluation digitalisierungsbezogener Kompetenzen von angehenden Chemielehrkräften
ISBN 978-3-8325-5410-1 49.50 EUR

323 Lars-Frederik Weiß: Der Flipped Classroom in der Physik-Lehre. *Empirische Untersuchungen in Schule und Hochschule*
ISBN 978-3-8325-5418-7 51.00 EUR

324 Tilmann Steinmetz: Kumulatives Lehren und Lernen im Lehramtsstudium Physik. *Theorie und Evaluation eines Lehrkonzepts*
ISBN 978-3-8325-5421-7 51.00 EUR

325 Kübra Nur Celik: Entwicklung von chemischem Fachwissen in der Sekundarstufe I. *Validierung einer Learning Progression für die Basiskonzepte „Struktur der Materie“, „Chemische Reaktion“ und„Energie“ im Kompetenzbereich Umgang mit Fachwissen*
ISBN 978-3-8325-5431-6 55.00 EUR

326 Matthias Ungermann: Förderung des Verständnisses von Nature of Science und der experimentellen Kompetenz im Schüler*innen-Labor Physik in Abgrenzung zum Regelunterricht
ISBN 978-3-8325-5442-2 55.50 EUR

327 Christoph Hoyer: Multimedial unterstütztes Experimentieren im webbasierten Labor zur Messung, Visualisierung und Analyse des Feldes eines Permanentmagneten
ISBN 978-3-8325-5453-8 45.00 EUR

328 Tobias Schüttler: Schülerlabore als interessefördernde authentische Lernorte für den naturwissenschaftlichen Unterricht nutzen
ISBN 978-3-8325-5454-5 50.50 EUR

329 Christopher Kurth: Die Kompetenz von Studierenden, Schülerschwierigkeiten beim eigenständigen Experimentieren zu diagnostizieren
ISBN 978-3-8325-5457-6 58.50 EUR

330 Dagmar Michna: Inklusiver Anfangsunterricht Chemie *Entwicklung und Evaluation einer Unterrichtseinheit zur Einführung der chemischen Reaktion*
ISBN 978-3-8325-5463-7 49.50 EUR

331 Marco Seiter: Die Bedeutung der Elementarisierung für den Erfolg von Mechanikunterricht in der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-5471-2 66.00 EUR

332 Jörn Hägele: Kompetenzaufbau zum experimentbezogenen Denken und Arbeiten. *Videobasierte Analysen zu Aktivitäten und Vorstellungen von Schülerinnen und Schülern der gymnasialen Oberstufe bei der Bearbeitung von fachmethodischer Instruktion*
ISBN 978-3-8325-5476-7 56.50 EUR

333 Erik Heine: Wissenschaftliche Kontroversen im Physikunterricht. *Explorationsstudie zum Umgang von Physiklehrkräften und Physiklehramtsstudierenden mit einer wissenschaftlichen Kontroverse am Beispiel der Masse in der Speziellen Relativitätstheorie*
ISBN 978-3-8325-5478-1 48.50 EUR

334 Simon Goertz: Module und Lernzirkel der Plattform FLexKom zur Förderung experimenteller Kompetenzen in der Schulpraxis *Verlauf und Ergebnisse einer Design-Based Research Studie*
ISBN 978-3-8325-5494-1 66.50 EUR

335 Christina Toschka: Lernen mit Modellexperimenten *Empirische Untersuchung der Wahrnehmung und des Denkens in Analogien beim Umgang mit Modellexperimenten*
ISBN 978-3-8325-5495-8 50.00 EUR

336 Alina Behrendt: Chemiebezogene Kompetenzen in der Übergangsphase zwischen dem Sachunterricht der Primarstufe und dem Chemieunterricht der Sekundarstufe I
ISBN 978-3-8325-5498-9 40.50 EUR

337 Manuel Daiber: Entwicklung eines Lehrkonzepts für eine elementare Quantenmechanik *Formuliert mit In-Out Symbolen*
ISBN 978-3-8325-5498-9 48.50 EUR

338 Felix Pawlak: Das Gemeinsame Experimentieren (an-)leiten *Eine qualitative Studie zum chemiespezifischen Classroom-Management*
ISBN 978-3-8325-5508-5 46.50 EUR

Alle erschienenen Bücher können unter der angegebenen ISBN direkt online (http://www.logos-verlag.de) oder per Fax (030 - 42 85 10 92) beim Logos Verlag Berlin bestellt werden.

Studien zum Physik- und Chemielernen

Herausgegeben von Martin Hopf, Hans Niedderer, Mathias Ropohl und Elke Sumfleth

Die Reihe umfasst inzwischen eine große Zahl von wissenschaftlichen Arbeiten aus vielen Arbeitsgruppen der Physik- und Chemiedidaktik und zeichnet damit ein gültiges Bild der empirischen physik- und chemiedidaktischen Forschung im deutschsprachigen Raum.
Die Herausgeber laden daher Interessenten zu neuen Beiträgen ein und bitten sie, sich im Bedarfsfall an den Logos-Verlag oder an ein Mitglied des Herausgeberteams zu wenden.

Kontaktadressen:

Univ.-Prof. Dr. Martin Hopf
Universität Wien,
Österreichisches Kompetenzzentrum
für Didaktik der Physik,
Porzellangasse 4, Stiege 2,
1090 Wien, Österreich,
Tel. +43-1-4277-60330,
e-mail: martin.hopf@univie.ac.at

Prof. Dr. Hans Niedderer
Inst. f. Didaktik der Naturwissenschaften,
Abt. Physikdidaktik,
FB Physik/ Elektrotechnik,
Universität Bremen,
Postfach 33 04 40, 28334 Bremen
Tel. 0421-218 4695 (Sekretariat),
e-mail: niedderer@physik.uni-bremen.de

Prof. Dr. Mathias Ropohl
Didaktik der Chemie,
Fakultät für Chemie,
Universität Duisburg-Essen,
Schützenbahn 70, 45127 Essen,
Tel. 0201-183 2704,
e-mail: mathias.ropohl@uni-due.de

Prof. Dr. Elke Sumfleth
Didaktik der Chemie,
Fakultät für Chemie,
Universität Duisburg-Essen,
Schützenbahn 70, 45127 Essen
Tel. 0201-183 3757/3761,
e-mail: elke.sumfleth@uni-due.de

Erkenntnisgewinnung ist in den Naturwissenschaften untrennbar mit wissenschaftlichen Kontroversen verknüpft, die auch für den Physikunterricht einen Bildungswert besitzen, insbesondere im Hinblick auf kritische Urteilsbildung, Multiperspektivität und ein angemessenes Nature-of-Science-Verständnis.

Basierend auf einer Charakterisierung wissenschaftlicher Kontroversen wird am Beispiel der Frage nach der Relativität der Masse in der Speziellen Relativitätstheorie in einer explorativ-qualitativen Studie untersucht, wie Physiklehrkräfte und Physiklehramtsstudierende mit einer solchen Kontroverse umgehen und inwieweit sie deren Bildungswert nutzen. Dazu werden sowohl Gedankenauflistungen, die von den Befragten nach dem Lesen von Textmaterialien zu den unterschiedlichen Fachpositionen erstellt wurden, als auch Antworten zu verschiedenen Textvignetten mit Hilfe der qualitativen Inhaltsanalyse ausgewertet.

Insgesamt zeigt sich, dass die Studierenden häufiger offen gegenüber den kontroversen fachwissenschaftlichen Positionen sind als die Lehrkräfte. Unterschiede in Bezug auf die Realisierung des Bildungswertes im Unterrichtskontext werden mithilfe von fünf Typen systematisch beschrieben. Ein Großteil der Befragten weist dabei Ansätze zur Umsetzung von Kontroversität im Physikunterricht auf. Die Mehrheit vertritt auch eine eigene fachwissenschaftliche Position und ein Teil der Befragten nutzt die wissenschaftliche Kontroverse zur Thematisierung von Nature-of-Science-Aspekten.

Logos Verlag Berlin

ISBN 978-3-8325-5478-1